



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia de Energia**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE  
ESCOAMENTO BIFÁSICO PARA ESTUDO DE  
HIDROCICLONE ATRAVÉS DO SOFTWARE ANSYS®**

**Autor: Irvylle Raimunda Mourão Cavalcante  
Orientador: Dr. Felipe Chagas Storti**

**Brasília, DF  
2018**



**IRVYLLE RAIMUNDA MOURÃO CAVALCANTE**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTO BIFÁSICO PARA  
ESTUDO DE HIDROCICLONE ATRAVÉS DO SOFTWARE ANSYS®**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Dr. Felipe Chagas Storti

**Brasília, DF  
2018**

**CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

CAVALCANTE, Irvylle.

Modelagem e simulação numérica de escoamento bifásico para estudo de hidrociclone através do software ANSYS / Irvylle Raimunda Mourão Cavalcante. Brasília: UnB, 2017.

Monografia Engenharia de Energia – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2018. Orientação: Dr: Felipe Chagas Storti.

1. Hidrociclone. 2. Simulação. 3. Petróleo I. Storti, Felipe. II.  
Modelagem e simulação numérica de escoamento bifásico para estudo de hidrociclone através do software ANSYS.

CDU 66.066



## **MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTO BIFÁSICO PARA ESTUDO DE HIDROCICLONE ATRAVÉS DO SOFTWARE ANSYS**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (26/03/2018) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. (Dr): Felipe Chagas Storti, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof. (Dra): Juliana Petrocchi Rodrigues, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

---

**Prof. (Dr): Luciano Gonçalves Noletto, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2018

Esse trabalho é dedicado a Deus, aos familiares e à ciência, na qual contíguo fomentaram minha história, construindo este sonho na imensidão do conhecimento.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial à Deus que com desmensurado amor nos concedeu o dom da vida e a fortaleza espiritual de nossa vivência terrestre, à santa Maria de Nazaré que por meio de meu livre-arbítrio, disponho-me sobre ti a minha fé sobre o teu zeloso cuidado e intercessão protecional por nós a cada novo dia.

Penhoros aos meus pais, Ana Geovanda e Justineto (Deus o tenha em seus braços na sua nova morada no céu, na qual um dia reencontrar-nos-emos). Agradeço a vocês por me guiarem tão bem nessa estrada da vida que por, muitas vezes, é fatídica e tempestuosa, mas com ensinamentos e direção, podemos contornar as pedras, buracos e a escuridão que a vida nos submete. Ainda mais que agradeço por todo amor materno e paterno que aos cuidados de colo, às noites mal dormidas, aos choros, o teu consolo e carinho era tudo que tínhamos para acalantar nossos sonhos, por mais que isso, dedico este momento da vida a vocês que me tornaram melhor a cada novo dia e que sem vocês, talvez esse sonho não fosse possível.

Remercio às minhas amadas irmãs, Kamylle e Thamyres, a completa gratidão de poder ter compartilhado minha vida, os sonhos, as alegrias e também as tristezas por todos esses anos com suas primorosas companhias, na qual momentos singulares como esse foi de essencial importância todo apoio e alvitre que vocês dispuseram para alcançar mais uma estrela.

Também, não poderia deixar de mencionar meu imenso anelo de gratidão aos familiares que contribuíram com notável participação na construção do meu saber e da carreira profissional com incontáveis desejos de sucesso para o futuro, na qual consagro esse momento em nome de todos os familiares, Socorro Rodrigues Bonfim e aos meus avós e avôs, Raimunda Didi, Maria José, João e Manoel Diogo que como exemplos de vida para meu caminho pessoal e profissional, fizeram-me dos meus objetivos uma realidade vislumbrada neles. Exprimo aqui, meu muito obrigada a vocês.

Tão longínquo da família, parentes e amigos, a vida foi bem generosa comigo ao me dá de presente um amigo como você, Joel Filho, tornando esse âmbito candango tão mais alegre e divertido, seja por todos os intensos dias de estudo, seja pelo agradável passeio ao Goiás, seja por todas as maravilhosas lanches que já comemos, seja pela alegria em passar naquelas matérias impossíveis, seja pelas derrotas com sabor de seguir em frente, seja por todos os estresses que a engenharia nos trouxe, mas sobretudo, seja por todo amor que me destes que fez de mim alguém potencialmente melhor do que ontem e uma engenheira imensamente realizada por construir esse sonho ao seu lado, assevero-te a ti, mais uma vez o meu muito obrigada.

Juntamente com o Jô, agradeço de todo coração aos seus pais Joel Costa, Heloísa e seus irmãos por serem alguém tão extravasados de amor que nos contagia com todo sentimento de bem ao próximo, gostaria de deixar por aqui grafado, meu mais singelo obrigada e que o senhor os abençoe com a luz espiritual de Cristo.

Não poderia deixar de agradecer a UnB e todo conhecimento construído ao longo desses anos, aos mestres que me ensinaram a arte da engenharia nessa trajetória do conhecimento tão importante para redescobrir-nos, lutar, cair e levantar todos os dias mais fortes.

Aos amigos que fizeram parte dos meus dias bons e ruins, não posso esquecer de todas as risadas, choros, decepções, conquistas, visitas e muito estudo ao longo de todo esse tempo, na qual não poderia deixar de compartilhar desses grandes momentos aqui nesse papel, mas com grande sentimento o seu valor amigo e deixo aqui registrado no meu coração a minha gratidão por vocês.

Também queria agradecer e não menos importante, o meu orientador Felipe Storti que com paciência, sabedoria e grande conhecimento me guiou com muito zelo à essa etapa da vida de trabalho acadêmico, aconselhou-me com toda sua vasta experiência e trouxe para a FGA mais talento e sabedoria a ser transmitido a todos esses jovens aprendizes da palavra e do silêncio, assim sendo, dedico-lhe meu muito obrigada.

Fomento, igualmente, meu agradecimento à professora Julinana e à professora Patrícia que me lecionou petróleo e, também, pelos conselhos na época de caloura, apoio quando foi preciso na Universidade e pelo conhecimento obtido em sala por ambas.

Também, agradeço ao professor Luciano Noletto por ter sido tão importante na minha carreira acadêmica desde dinâmica dos fluidos, sistemas hidrelétricos, monitorias e PIBIC, até o final dessa jornada, na qual acrescentou-me grande valor acadêmico e pessoal que com seu vasto conhecimento e simpatia, trouxe-me mais riqueza a este dispendioso e êxito trabalho. Meu muito obrigada.

Não há nenhum poço tão profundo que o amor de Deus não seja mais profundo ainda.



## RESUMO

O petróleo tem uma grande importância na sociedade, sendo, portanto, uma potente fonte de energia que atua fortemente no âmbito da economia, engenharia, política e tecnologia. Portanto, o presente trabalho aborda uma caracterização acerca dos hidrociclones que é bastante utilizado na indústria petrolífera, na qual promovem a separação de componentes através de um campo centrífugo. Para tanto, realizou-se por meio de metodologia numérica, a modelagem e simulação de um escoamento bifásico (óleo-água) em um hidrociclone. Utilizando-se para isso da Fluidodinâmica Computacional (CFD) que é uma ferramenta que auxilia no estudo de escoamentos, pois emprega-se a resolução numérica das equações de conservação para presumir o comportamento do fluido, operando através do *software ANSYS®*. Ademais, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o perfil de velocidade e a distribuição de pressão ao longo do hidrociclone, modelado a partir da geometria do experimento prático de Marins *et al.* (2010). Além de analisar a trajetória das linhas de corrente e o comportamento das partículas de óleo (fase dispersa) e da água (fase contínua) no interior do hidrociclone, comparando-as com a literatura e trabalhos afins. Os resultados mostraram-se satisfatórios e coerentes com a literatura, nas qual os perfis de velocidade e pressão mantiveram o comportamento esperado para hidrociclones e na fase dispersa, quanto a eficiência de separação fracionada, identificou-se que de 284 partículas de óleo injetadas, 267 saíram pelo *overflow* e 17 saíram pelo *underflow*. Apresentando, portanto, a simulação realizada, um ótimo desempenho e referência para realização de trabalhos futuros.

**Palavras-chave:** hidrociclone, petróleo, simulação, CFD, água, óleo.

## ABSTRACT

Petroleum has a great importance in society, being therefore a potent source of energy that acts strongly in scope of economics, engineering, politics and technology. Therefore, the present work addresses a description of the hydrocarbons that is widely used in the petroleum industry, in which they promote the separation of components through a centrifugal field. For that, a modeling and simulation of a biphasic flow (oil-water) in a hydrocyclone was carried out by means of experimental numerical methodology. Computational Fluid Dynamics (CFD) is a tool that is not a study of flow, because the numerical resolution of the conservation equations is used to presume the behavior of the fluid, operating through ANSYS software. In addition to analyzing the trajectory of current lines and the behavior of the oil and water particles (continuous phase) not inside the hydrocyclone, comparing it with literature and works. The results were satisfactory and consistent with a literature, in the ratings of speed and pressure maintained the expected behavior for hydrocyclones and in the dispersed phase, for a fractional separation efficiency, it was identified that of 284 injected oil particles, 267 left by overflow and 17 left by underflow. Therefore, it presents an accomplished simulation, a great performance and reference for future work.

**Keywords:** hydrocyclone, petroleum, simulation, CFD, water, oil.

## ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Planta de processamento primário do petróleo .....	19
Figura 2. Princípio de funcionamento de um hidrociclone .....	21
Figura 3. Curva de eficiência de grau .....	24
Figura 4. Hidrociclone convencional .....	30
Figura 5. Hidrociclone de fundo largo .....	31
Figura 6. Hidrociclone para separação líquido-líquido. ....	32
Figura 7. Hidrociclone para separação de gás .....	33
Figura 8. Componentes de velocidade de um hidrociclone .....	34
Figura 9. Distribuição de velocidade tangencial em um hidrociclone .....	35
Figura 10. a) Distribuição dos perfis de velocidade .....	36
Figura 11. Esquemático de soluções de problemas em CFD .....	41
Figura 12. Medidas da geometria do hidrociclone simulado .....	43
Figura 13. Geração de malha na geometria do hidrociclone .....	44
Figura 14. Linha de Referência inserida no FLUENT .....	46
Figura 15. Perfil de pressão do hidrociclone simulado .....	50
Figura 16. Perfil de velocidade axial no hidrociclone simulado .....	51
Figura 17. Perfil de velocidade radial no hidrociclone simulado. ....	52
Figura 18. Perfil de velocidade tangencial no hidrociclone simulado .....	53
Figura 19. Linhas de corrente do escoamento .....	56
Figura 20. Escoamento de óleo e água no hidrociclone .....	56
Figura 21. Linhas de corrente dos fluidos .....	56

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Previsão de crescimento da matriz energética mundial.....	18
Gráfico 2. Perfil de pressão ao longo do eixo vertical .....	54
Gráfico 3. Perfil de velocidade axial ao longo do eixo vertical .....	54
Gráfico 4. Perfil de velocidade radial ao longo do eixo vertical .....	55
Gráfico 5. Perfil de velocidade tangencial ao longo do eixo vertical.....	55

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros para os principais tipos de hidrociclone.....	28
Tabela 2. Dimensões do Hidrociclone.....	44
Tabela 3. Condições de contorno para simulação .....	45
Tabela 4. Condições de contorno para a simulação bifásica .....	45
Tabela 5. Parâmetros para o teste de malha.....	47

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1. OBJETIVOS GERAIS .....	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 PETRÓLEO NA MATRIZ ENERGÉTICA .....	17
2.2 PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE FLUIDOS .....	19
2.3 HIDROCICLONES .....	20
2.4 MODELOS DE HIDROCICLONES .....	29
2.4.1 Geometria de hidrociclone convencional de ângulo estreito e largo.....	29
2.4.2 Hidrociclone de fundo plano com descargas de sólidos centrais .....	30
2.4.3 Hidrociclone para separação líquido-líquido.....	31
2.4.4 Ciclone líquido para separação de gás.....	33
2.5 VELOCIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO EM UM HIDROCICLONE .....	34
2.6 MODELOS MATEMÁTICOS .....	36
2.6.1 Modelo de turbulência .....	38
2.6.2 Abordagem Euleriana-Euleriana .....	39
2.6.3 Abordagem Euleriana-Lagrangeana .....	39
2.7 FLUIDOMECÂNICA COMPUTACIONAL .....	40
<b>3.0 METODOLOGIA.....</b>	<b>42</b>
3.1 GEOMETRIA DO HIDROCICLONE.....	42
3.2 GERAÇÃO E TESTE DE MALHA .....	44
3.3 SIMULAÇÃO BIFÁSICA .....	45
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
4.1 RESULTADO DO TESTE DE MALHAS .....	47
4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO BIFÁSICA .....	48
4.1 EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO FRACIONADA.....	57
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de petróleo é um elemento intrínseco para a sociedade, sobretudo para atividades industriais. Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), as fontes não renováveis (carvão, gás natural, petróleo, etc.) respondem por cerca de 87% da matriz energética global, com destaque para o petróleo, que é a fonte mais utilizada desde a Segunda Revolução Industrial, durante o século XIX.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE,2012) o petróleo é responsável por cerca de 37% da produção de energia no mundo, dado que o setor de transporte é o principal uso desse óleo (50%). Portanto, é estimado que 25% é utilizado pelas indústrias e os outros 25% são para a indústria química e para a geração de energia nas usinas termelétricas.

Com base nisso, no processo de produção de petróleo, um dos contaminantes mais indesejáveis é a água, na qual é extraída junto com o óleo e é produzida em grandes volumes, formando emulsões de difícil separação. Portanto, a presença de água associada ao petróleo, provoca uma série de problemas nas etapas de produção, transporte e refino, tornando-se necessário, então, tratar essa água a fim de recuperar parte do óleo emulsionado e condicioná-la para reinjeção ou para descarte. (FREITAS, 2009)

Desse modo, otimizar os processos de produção de petróleo é de suma importância, pois em um campo de produção de petróleo, cerca de 5 a 15% do volume produzido é água, na qual esse volume não pode ser lançado no ambiente, antes de um tratamento. O preço por metro quadrado de área de convés para equipamentos é muito elevado, em plataformas *offshore*, e a busca por separadores compactos e eficientes tem sido um desafio. Entretanto, os hidrociclones são uma ótima escolha para desempenhar esse papel, devido ao campo centrífugo que promove a separação, diminuindo o tempo de residência e aumentando a eficiência quando comparado com separadores gravitacionais (ALMEIDA *et al.*2009).

Em vista disso, com objetivo de reduzir o tempo de separação água-óleo, os hidrociclones foram introduzidos na indústria do petróleo para separação de águas oleosas no início da década de 1970. Os principais modelos convencionais de hidrociclones não tiveram significativa aplicação até depois da Segunda Guerra Mundial. Portanto, os hidrociclones e ciclones sucedeu-se primeiro em processo de mineração, posteriormente na indústria química, petroquímica, geração de energia, indústria têxtil, metalúrgica e etc (SVAROVSKY,1991).

A separação líquido/líquido com o uso de hidrociclones tem sido instrumento de pesquisas há muitas décadas. Uma das aplicações de hidrociclones líquido/líquido é na indústria do petróleo. A remoção de pequenas partículas de óleo dispersa na água salgada durante a

produção de petróleo oriundo dos poços petrolíferos são de difícil separação e, assim, o uso de hidrociclone é de suma importância para a compartimentação líquido/líquido (óleo/água) (ARAÚJO *et al.* 2015).

Assim sendo, as questões constantes impostas ao processo de exploração, produção e recuperação de reservas em poços de petróleo, bem como seus desafios e técnicas, apresentam-se de forma significativa e relevante diante do amplo uso dessa fonte. Os altos custos envolvidos, na ordem de bilhões de dólares, trazem a atenção, principalmente, dos investidores, permitindo o desenvolvimento e trazendo novas tecnologias. Com isso, o uso de hidrociclones tem-se mostrado de grande utilidade. A qualidade da separação, otimização dos processos e tempo são fatores diretamente ligados a lucratividade para maximizar as taxas de produção e recuperação de reservas.

### 1.1. OBJETIVOS GERAIS

Esse trabalho visa realizar um estudo de escoamento em hidrociclone, na qual são equipamentos de separação estático em que produz rotação através da alimentação tangencial sob pressão. Utilizando-se para isso do programa ANSYS FLUENT®, mediante a ferramenta Fluidodinâmica Computacional (CFD) que auxilia no estudo de escoamentos.

Assim, como objetivo do presente trabalho foi possível analisar o comportamento da separação (líquido/líquido) para água e óleo, na qual foi modelado a geometria do hidrociclone a partir do experimento prático de (Marins *et al.* 2010). Do mesmo modo, tem por objetivo este trabalho, avaliar o perfil de velocidade e a distribuição de pressão ao longo do hidrociclone, analisar a trajetória das linhas de corrente formadas em direção ao *overflow* e ao *underflow*, o comportamento fluidodinâmico das partículas de óleo (fase dispersa) e da água (fase contínua), como também, a eficiência de separação fracionada no interior do hidrociclone.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelagem tridimensional de um hidrociclone
- Estudo CFD (Fluidodinâmica computacional)
- Análise dos perfis de velocidades axiais, radiais e tangenciais
- Análise da distribuição de pressão no interior do hidrociclone
- Análise da trajetória das linhas de correntes e da eficiência de separação



## 2. ESTADO DA ARTE

Investimentos no setor de exploração e Produção (E&P) são abundantes. O desenvolvimento de uma acumulação de óleo ou de gás é um empreendimento com características de alto custo, especialmente em mar aberto (*offshore*) e as incertezas são grandes. O resultado de falhas técnica ou comercial quando o investimento é tão alto é muito significativo para a maioria dos investidores, nas quais demandam esforços para entender e quantificar as incertezas e levantar os níveis consequentes de riscos e de benefícios para propostas de investimento.

Jahn *et al.* (2012) em Introdução à Exploração e Produção de hidrocarbonetos especifica que em projetos de E&P é comum a constante atualização e revisão das variáveis envolvidas, como por exemplo, volume do reservatório, curvas de produção, taxa de recuperação, preços praticados no mercado, tributação, etc.

Pinto (2007) argumenta que a redução do consumo energético através das melhorias da eficiência dos processos produtivos e dos equipamentos e dispositivos domésticos, frutos do avanço tecnológico, têm mostrado resultados sobre a redução das pressões sobre o abastecimento. No entanto, a escolha da estrutura produtiva e, portanto, dos setores vão desempenhar um papel-chave na dinâmica econômica de cada país.

Ainda por meio disso, tendo em vista a importância do petróleo para a sociedade presente e futura, Mendes (2012) analisa a partir de uma metodologia argumentativa que as atividades do petróleo geram grandes responsabilidade ambientais, afetando o ambiente local de exploração, além de estarem sujeitas a graves acidentes ambientais, como, por exemplo, derramamento de petróleo em mar, sendo necessário investir em medidas de mitigação e controle ambiental para que explorações futuras sejam de baixo risco econômico quanto sustentável, portanto sendo necessário investir em tecnologias seguras e eficientes.

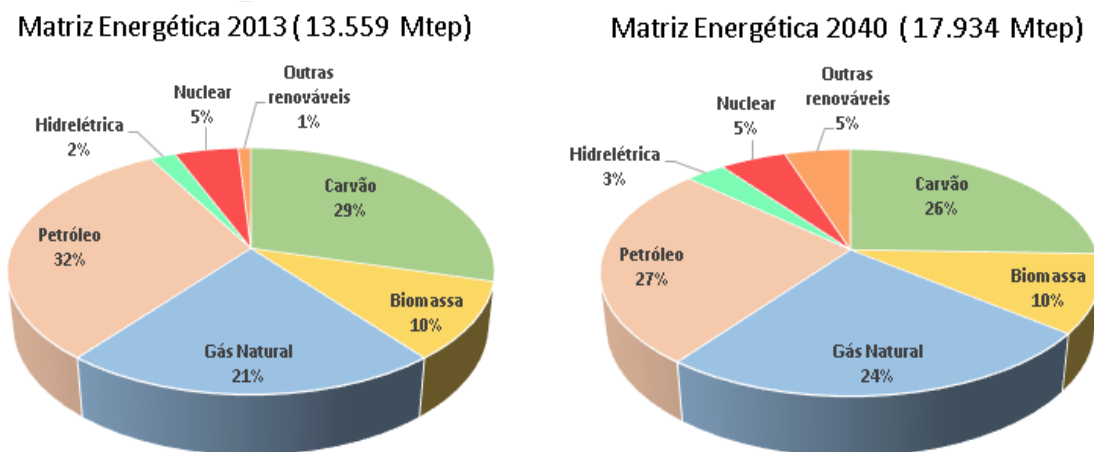
### 2.1 PETRÓLEO NA MATRIZ ENERGÉTICA

Os hidrocarbonetos equivalem mais da metade da energia primária consumida em escala mundial. Mediante o *World Energy Outlook* (WEO), 31 % do consumo energético primário global provém do petróleo, consequentemente, a fonte energética mais utilizada.

Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), no cenário baseado do WEO de 2015, o petróleo registrará uma diminuição de cinco pontos percentuais na matriz energética de

2040 comparada a 2013. Por outro lado, o gás natural aumentará sua participação na matriz energética de 21% para 24% sobre uma procura energética total estimada em 17.934 milhões de toneladas correspondente de petróleo.

Portanto, os dados e a evolução previsível de tal matriz para a demanda mundial de energia primária segundo a Agência Internacional de Energia (AIE) é mostrada no Graf. (1) abaixo:



**Gráfico 1.** Previsão de crescimento da matriz energética mundial. Fonte: AIE, Gráfico: Elaboração Própria.

O conhecimento obtido ao longo de anos de experiência em operações na Bacia de Campos foi imprescindível para o desenvolvimento das novas tecnologias e assim foi possível sondar novos campos de petróleo em águas ultraprofundas e, conseqüentemente, enfrentar alguns desafios de exploração do Pré-Sal. Portanto, foram necessárias adaptações das tecnologias existentes, assim como dedicação de tempo e recursos para testar novos materiais e soluções em regiões de difícil acesso.

O Gráfico (2) mostra o número de poços de Pré-sal perfurados na bacia de Santos destacando-se os anos de 2011 e 2012, onde houve a efetivação da exploração de um número significativo de reservas que estavam em análise de teste e estudo.

Apesar de muita tecnologia utilizada na indústria petroleira, é necessário aprimorar seus procedimentos, não somente no processo de perfuração, bem como no refinamento, distribuição, taxa de recuperação de reservas, estudos e pesquisas a respeito do assunto.

## 2.2 PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE FLUIDOS

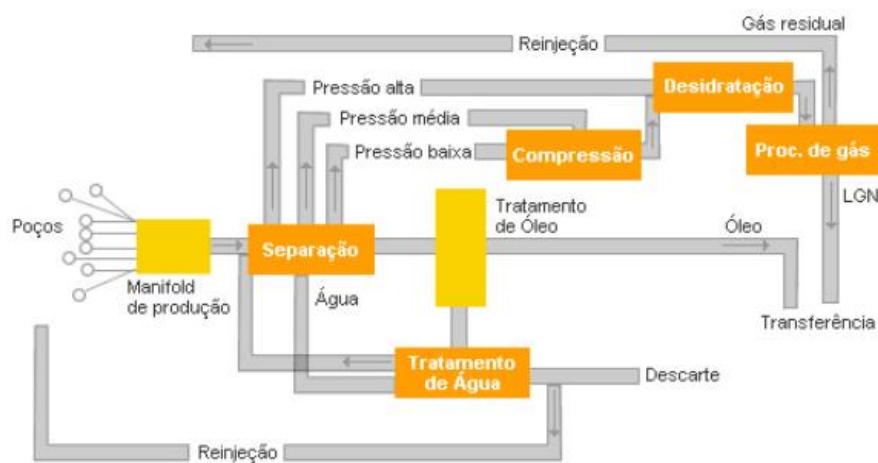
O petróleo, quando produzido, carrega também gás, sólidos e água. Essas impurezas precisam ser separadas, antes do processo de refino. Portanto, existem processos de separação para essas diferentes fases, na qual ocorrem em uma planta de processamento primário do petróleo.

Os equipamentos utilizados no tratamento de águas oleosas em plataformas de produção são separadores gravitacionais, (separador gás/óleo/água). O campo gravitacional é usado para promover a separação água-óleo nesses equipamentos. Porém, devido à pequena diferença entre as densidades do óleo e da água, esses separadores possuem uma velocidade terminal pequena (FREITAS, 2007).

As baixas velocidades terminais e os elevados volumes produzidos exigem altos tempos de residência para que a separação produza os níveis de concentração oleosa determinados pelos órgãos de controle ambiental (SANTOS, 2015).

Na seção de acumulação de líquido, a água fica retida durante alguns minutos no fundo do separador. Separa-se a água do óleo através de um condutor de líquido e separam-se as bolhas de gás que ficaram no óleo, através de uma chaminé (ANNA *et al.* 2005).

Um esquema típico de uma planta de processamento primário de petróleo é mostrado na Fig. (1)



**Figura 1.**Planta de processamento primário do petróleo.Fonte: (SANTOS, 2015)

A planta contém separadores gravitacionais, separador eletrostático e o sistema de tratamento de água. Nesta última etapa do processo destacam-se os hidrociclones e flotores, na qual no presente conteúdo deste trabalho, destaca-se o estudo dos hidrociclones adiante.

Existem, por vezes, alguns problemas operacionais nos separadores, como por exemplo, as emulsões, que se formam na interface óleo/água, por serem ambos imiscíveis, dificultam o controle do nível de líquido no separador e diminuem o tempo de retenção da fase gasosa e líquida no separador, resultando numa redução de eficiência do processo (CHAMARELLS,2012).

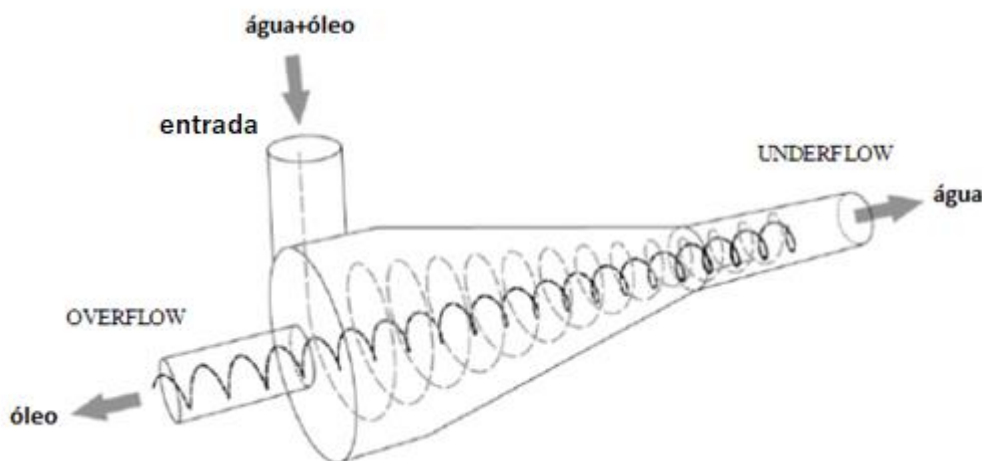
Desse modo, há uma demanda industrial para a substituição dos separadores gravitacionais encontrados em plataformas de petróleo por hidrociclones. Os separadores gravitacionais apresentam desvantagens como a necessidade de grandes equipamentos, extensos períodos para uma separação completa das fases, devido o pequeno diâmetro dessas gotículas e a necessidade de aquecer o sistema para melhorar a separação, na qual o tempo de residência necessário para promover a separação seria impraticável.

## 2.3 HIDROCICLONES

Hidrociclone é um equipamento de separação estático que utiliza como princípio a força centrífuga. Seu funcionamento deve-se à alimentação tangencial na parte cilíndrica do mesmo. Com isso, forma-se um movimento em espiral descendente, arrastando as partículas maiores e mais pesadas para saída inferior do equipamento, denominada *underflow*. Já as partículas menores e menos densas são arrastadas para o centro do equipamento, onde ocorre um estrangulamento no vórtice e forma-se um movimento em espiral ascendente que saem por um orifício denominado *overflow*. As vazões do *underflow* e *overflow* são obtidas pelo diâmetro dos mesmos e pela pressão em que o equipamento é submetido para operar. Todo hidrociclone opera em conjunto com uma bomba centrífuga que é responsável por manter a pressão de trabalho do mesmo (SVAROVSKY,1984).

A suspensão alimentada no hidrociclone forma um vórtice primário ao longo da superfície interna das paredes cilíndricas, com direção ao ápice do cone. No estrangulamento do cone, somente uma parte do líquido descarregada como *underflow*, arrastando as partículas grossas e pequena parte das partículas finas. A maior parte do líquido transportando partículas finas é forçada a deixar o ciclone através da saída superior, o *overflow*, devido a formação de um vórtice secundário interno que gira em torno do eixo em movimento ascendente. No centro do hidrociclone cria-se uma baixa pressão que recolhe todo o ar introduzido sob forma de bolhas ou dissolvido na água de alimentação. O aumento da velocidade radial no vórtice secundário gera uma força centrífuga muito elevada, produzindo uma separação secundária totalmente eficiente (ALVES,2012).

Portanto, os hidrociclones tem grandes vantagens, pois fornecem baixos tempos de residência e, com isso, rápidos tempos de resposta em relação a sistemas de controle, suportam drásticas condições de operação quanto à pressão e vazão e apresentam grande versatilidade quanto às suas aplicações



**Figura 2.** Princípio de funcionamento de um hidrociclone. Fonte: Adaptado de (HUSVEG et al. 2007)

Dessa forma a separação no interior do hidrociclone é o resultado de um processo em duas etapas, cujo diâmetro de corte final (corresponde ao tamanho de partícula com 50% de probabilidade de serem direcionadas ao *overflow* e *underflow*) é determinado, principalmente, pela aceleração do vórtice secundário. O funcionamento ótimo de um hidrociclone depende da constância das condições na alimentação, especialmente da vazão volumétrica do fluxo. Para assegurar essa condição, é preciso manter a alimentação da bomba constante evitando o bombeamento de ar ou espuma (STORTI,2013).

Os hidrociclones podem ser fabricados em poliuretano, aço revestido em borracha, aço revestido em poliuretano, aço inoxidável, dependendo da aplicação e material a ser tratado. Para garantir uma homogênea e igual distribuição da pressão e vazão da polpa, são utilizados sistemas de distribuidores anulares em condições manuais ou totalmente automatizados. Estes distribuidores permitem otimizar o espaço para garantir uma alta vazão com a devida separação do *overflow* e *underflow* (ALMEIDA,2016).

A utilização de hidrociclones para promover separações baseadas no campo centrífugo iniciou-se há mais de um século. A primeira patente de hidrociclone foi depositada no final do século XIX e sua utilização era para misturas sólido-líquido. Sua utilização para separar

misturas líquido-líquido, especialmente óleo-água, foi iniciada em 1970 com pesquisas lideradas pela universidade de Southampton na Inglaterra. A evolução em sua geometria para a separação água-óleo culminou em entradas duplas e duas seções cônicas para aumentar a eficiência de separação. As vantagens em sua utilização são devido ao fato de serem equipamentos com baixos custos, compactos, necessitando pouca manutenção, por não possuir partes móveis e são bastante versáteis (SVAROVSKY,1984).

Portanto, os hidrociclones apresentam grandes vantagens em relação a outros equipamentos de separação, dentre as quais podem-se destacar (MEDRONHO *et al.* 2004):

1. Podem ser operados quanto a baixas até altas temperaturas e pressões.
2. Os hidrociclones são extremamente versáteis em aplicações que podem ser usadas para clarificação de líquidos e sólidos, separação de dois líquidos imiscíveis, desgaseificar líquidos, de acordo com a densidade ou forma.
3. Estrutura simples e de fácil instalação.
4. Baixo custo de instalação e operação.
5. Requer um espaço pequeno para operar.
6. Os hidrociclones possuem baixo tempo de residência.
7. A existência de altas forças cisalhantes no fluido é uma vantagem para classificação de sólidos, pois isso resulta na quebra de qualquer aglomeração.
8. São versáteis em suas aplicações, sendo usado em separação sólido/líquido, sólido/sólido, gás/líquido, gás/sólido e líquido/líquido.

Assim, a presença de emulsões do tipo água em óleo causa, dentre outros problemas, a elevação dos custos de petróleos, devido ao aumento da sua viscosidade aparente. Entende-se por emulsão uma mistura estável de dois líquidos imiscíveis, onde uma fase dispersa encontra-se na forma de gotículas em uma fase contínua. No caso das refinarias, as emulsões de petróleo causam problemas ainda mais sérios, tais como a corrosão dos equipamentos e a diminuição do valor comercial das frações mais pesadas, devido à elevação do teor de cinzas, resultante da presença de sais dissolvidos na água emulsionada (SOUZA *et al.*2015).

Os diâmetros de um hidrociclone individual variam de 10 mm a 2.5m. O tamanho de corte para a maioria dos sólidos varia de 2 a 250 $\mu$ m. Os fluxos de unidades individuais variam de 0.1 a 7200(m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>). As quedas de pressão operacionais variam de 0.34 a 6 bar, na qual partículas menores operam com pressões mais altas que as partículas maiores. As concentrações de sólidos no *underflow* que podem ser obtidas com hidrociclones raramente excedem 45 a 50% em volume, dependendo do tamanho e estrutura da partícula, condições operacionais e a natureza dos sólidos que estão sendo separados (SVAROVSKY, 1984).

Assim sendo, quanto as principais desvantagens dos hidrociclones são (SVAROVSKY,1984):

1. Os hidrociclones são um pouco inflexíveis, apresentando baixo índice de redução, devido à forte dependência de seu desempenho de separação, quanto à concentração no escoamento e na alimentação.
2. Os hridociclones são suscetíveis a abrasão, mas podem ser tomadas medidas para reduzir os efeitos.
3. A existência de cisalhamento, às vezes, pode se tornar uma desvantagem, porque a floculação não pode ser usada para melhorar a separação.

A interação partículas-fluidos é o principal meio do processo de separação. A separação é devida à inércia das partículas e um parâmetro inercial adimensional chamado de número de *Stoke* é um dos grupos adimensionais mais importantes para a descrição de desempenho do hidrociclone. Este número relaciona as forças inerciais e as forças hidrodinâmicas na partícula, na qual é definido como (SVAROVSKY, 1984):

$$Stk = \frac{\tau \cdot v}{D} \quad (1)$$

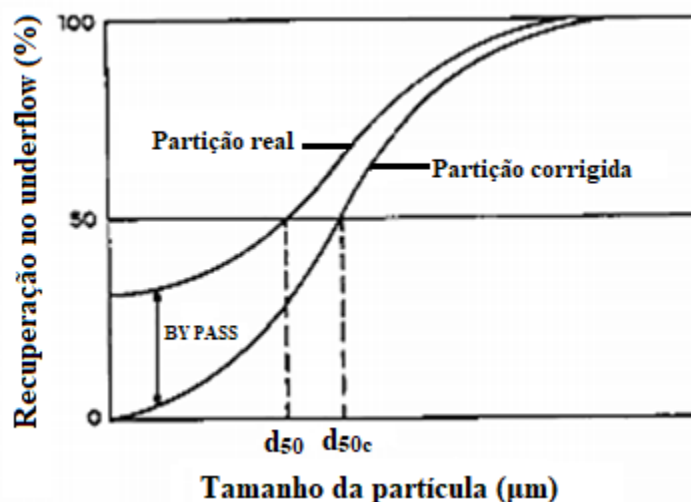
$\tau$  = tempo de relaxamento da partícula

$v$  = velocidade do fluido

$D$  = dimensão do obstáculo

A maneira mais objetiva de descrever o desempenho de separação do hidrociclone é pela curva de eficiência de grau ou curva de partição mostrada na Fig. (3), na qual por meio da

análise de partículas do *underflow* é possível construir uma curva. Assim a partir desses dados define-se experimentalmente o diâmetro de corte (SILVA *et al.* 2009).



**Figura 3.** Curva de eficiência de grau. Fonte: Adaptado de (CARRISCO *et al.* 2004)

Partículas maiores e mais densas tendem a ocupar as regiões mais próximas da parede sofrendo ações das forças centrípeta e rotacional, e as partículas menores são deslocadas para a região central do hidrociclone. Também, os hidrociclones não precisam necessariamente ser operados em posição vertical e podem ser inclinados ou, no caso dos mais pequenos, mesmo invertidos se for necessário (MORADIN, 1999).

É de suma importância as proporções relativas das dimensões do ciclone sob seu efeito na eficiência de separação e queda de pressão. Todas as medidas que aumentam a resistência ao escoamento melhoram a eficiência de separação e vice-versa. Isso se aplica a todas as proporções do ciclone. Assim, por exemplo, espera-se que um ciclone com saída relativamente pequenas ofereça uma maior recuperação em massa, mas oferecerá uma maior resistência ao escoamento e, portanto, terá menor capacidade (HUSVEG *et al.* 2007).

Assim como, o ajuste correto do diâmetro do orifício do *underflow* é vital para a melhor operação do ciclone, uma vez que o tamanho ótimo da abertura não pode ser predito de forma exata. É por esta razão que o diâmetro do orifício de fluxo inferior é considerado como uma variável operacional. O diâmetro do orifício é melhor ajustado após o início da instalação e também, durante a operação sempre que algumas condições de operação mudam. Vários modelos estão disponíveis para isso: bocais substituíveis, orifícios ajustáveis mecanicamente, orifícios ajustáveis operados de forma pneumática ou mesmo dispositivos de autoajuste que mantêm uma densidade constante no *underflow* (CRUZ, 2010).



Existe uma grande quantidade de condições operacionais que afetam o desempenho do hidrociclone, principalmente a queda de pressão operacional e a concentração da alimentação. Assim, com o aumento da queda de pressão, a eficiência da separação também aumenta (SOUZA *et al.* 2015).

O desempenho de um hidrociclone é, principalmente, influenciado pela geometria do equipamento, diferença de densidades das fases, pelas condições de operação como vazão da entrada, concentração e distribuição de diâmetros da fase dispersa, além da pressão nas saídas.

O aumento de escala dos hidrociclones baseia-se no conceito de tamanho de corte, definido como o tamanho de partícula a 50% na curva de eficiência de grau, porque a forma da curva de eficiência de grau permanece semelhante para uma dada família de ciclones geometricamente similares.

Segundo DIBB (1997), as variáveis operacionais que mais afetam o desempenho de hidrociclones são:

- A diferença de densidade que impacta diretamente na eficiência de separação, pois quanto maior esta diferença, maior é a facilidade de separação das fases.
- Quanto maior o diâmetro das partículas ou gotas, mais fácil é a separação.
- A temperatura afeta a densidade e viscosidade. Porém com a diminuição da viscosidade e com o aumento da temperatura, facilita a mobilidade da fase dispersa melhorando o desempenho.
- O aumento da vazão da alimentação promove um crescimento na intensidade do campo centrífugo e, conseqüentemente, da eficiência de separação.

O efeito das variáveis geométricas para o desempenho de um hidrociclone é condicionado pelos fatores descritos nos tópicos abaixo. Assim, considerando como referência entre as proporções e dimensões geométricas do hidrociclone, a Fig. (4), na sessão referente a modelos de geometria. (SVAROVSKY, 1984):

- **Aumento da capacidade:** Aumentar o diâmetro do hidrociclone ( $D$ ), assim como o diâmetro da entrada ( $D_i$ ), o diâmetro da saída ( $D_o$ ), o comprimento total do hidrociclone ( $L$ ) e reduzir o comprimento do *vortex finder* ( $l$ ) [prolongamento interno do tudo de saída superior].

- **Reduzir o diâmetro de corte (aumentar eficiência):** Reduzir o diâmetro do ciclone (D), assim como reduzir o diâmetro da entrada (Di), o diâmetro da saída (Do), o ângulo da região cônica ( $\theta$ ), o comprimento do *vortex finder* (l) e aumentar o comprimento total do equipamento (L).
- **Aumentar a razão de fluido:** Aumentar o diâmetro do *underflow* (Du) e reduzir o diâmetro do *overflow* (Do), aumentar a queda de pressão e diminuir o comprimento do *vortex finder* (l).

No processo de separação líquido-líquido utilizando hidrociclones, onde a fase contínua é mais densa que a fase dispersa, observa-se que as partículas deixam o equipamento pela saída superior. No entanto, uma fração da fase contínua também sai do hidrociclone pela mesma região. A razão entre a quantidade de fluido que entra pelo duto de alimentação e a quantidade que sai pelo concentrado damos o nome de razão de fluido, como mostra a Eq. (2) (ALVES,2012):

A Eq. (2), também, foi utilizada para análise do teste de malha no capítulo 3 adiante.

$$R_f = \frac{W_{fc}}{W_{fe}} \quad (2)$$

$R_f$ =Razão de fluido

$W_{fc}$ =Vazão mássica de água no concentrado

$W_{fe}$ =Vazão mássica de água na entrada

Além disso, para aproveitar ao máximo as vantagens do hidrociclone, muitas vezes é melhor usar unidades múltiplas, conectadas em série ou em paralelo. As conexões paralelas permitem que unidades mais eficientes e de menor diâmetro sejam usadas para tratar grandes fluxos. As conexões em série, por outro lado, são usadas para melhorar as recuperações globais (COELHO,2011).

Portanto, a eficiência de um hidrociclone é baseada no diâmetro de corte,  $D^*$  ou  $d_{50}$ , na qual como já mencionado, corresponde ao tamanho de partículas com 50% de probabilidade de serem direcionadas ao *underflow* e *overflow* . Consequentemente quanto menor o valor de  $D^*$ , maior será a eficiência de um hidrociclone. A Eq. (3) expressa como  $D^*$  se relaciona com outras variáveis de operação (MASSARANI,1986).

$$\frac{D^*}{Dc} = K \left( \frac{DC\mu}{Q(\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{2}} f(RL)P \quad (3)$$

$D^*$  = Diâmetro de corte ( $\eta = 0,5$ )

$Q$  = Vazão que alimenta o hidrociclone

$(\rho_s - \rho)$  = diferença de densidade entre as fases

$K$  = constante específica do tipo de configuração de hidrociclone

$f(RL)$  = Está relacionada entre o quociente da vazão no underflow e na alimentação

$\mu$  = Viscosidade do fluido

$P$  = Fator relacionado a concentração volumétrica na polpa

Sendo, portanto, o fator de correção  $f(RL)$  expresso por :

$$f(RL) = \frac{1}{1 + AR_L} \quad (4)$$

$$RL = B \left[ \frac{D_u}{D} \right] \quad (5)$$

Temos que:

$D_u$  = Diâmetro do *underflow*

$D$  = Diâmetro da parte cilíndrica

Para partículas próximas a uma esfera, o fator de correção  $P$  ou  $g(c_v)$ , pode ser expresso por meio da equação empírica abaixo:

$$g(c_v) = \frac{1}{(4.8(1 - c_v)^2 - 3.8(1 - c_v)^{1/2})} \quad (6)$$

$c_v$  = Concentração volumétrica na polpa

O mesmo efeito pode ser notado em relação ao diâmetro da parte cilíndrica, ou seja, quanto menor for o hidrociclone, maior será a sua eficiência, porém, quanto maior será a sua perda de carga. Portanto, sendo necessário nesse caso uma potência maior da bomba para impulsionar o fluido através do equipamento. No entanto, deve-se buscar um equilíbrio entre eficiência e custo de bombeamento (FREITAS, 2009).

Assim, quanto maior for a diferença de densidade entre o sólido e o fluido, mantendo-se as outras variáveis constantes, menor será o diâmetro de corte ( $D^*$ ), ou seja, maior será a eficiência de um hidrociclone.

Desse modo, a expressão clássica que relaciona vazão e queda de pressão em um regime turbulento é utilizada também para os hidrociclones, sendo, portanto, a queda de pressão medida entre o *overflow* e a alimentação (CRUZ,2010).

$$\beta = \frac{-\Delta P}{\rho U_c^2} \quad (7)$$

Onde,

$\beta$  = Parâmetro que depende da configuração do hidrociclone

$\Delta P$  = Diferença ou queda de pressão

$$U_c = \frac{Q}{(\pi D_c^2)/4} \quad (8)$$

$U_c$  = Velocidade média do fluido na sessão cilíndrica do equipamento

Existem algumas classificações de tipos de hidrociclone, de acordo com as relações entre suas dimensões básicas como já mencionado. Os dois grupos mais conhecidos de hidrociclone são o de geometria Bradley e Rietema. Portanto, os parâmetros  $K$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $\beta$  que aparecem nas equações anteriores e as condições de validade de operação dos hidrociclones podem ser definidas de acordo com a Tab. (1) abaixo, para os hidrociclones do tipo Bradley e Rietema:

**Tabela 1.** Parâmetros para os principais tipos de hidrociclone. Fonte: (SOUZA et al. 2015).

TIPOS	$K$	$A$	$B$	$C$	$\beta$	$Re$
Bradley	0.015	1.73	55.3	2.63	7500	$5.10^3 < Re < 50.10^3$
Rietema	0.039	1.73	145	5.75	1200	$3.10^3 < Re < 20.10^3$

Desse modo, outra grandeza muito importante a ser definida é a eficiência do hidrociclone, Eq. (9), na qual a eficiência individual de coleta, definida na Eq. (10) abaixo, é relativo a probabilidade de partícula de diâmetro ( $D^*$ ) ser coletada no *underflow* (MASSARANI,1986).

$$\eta = \frac{e^{\left(\frac{5D}{D^*}\right)-1}}{e^{\left(\frac{5D}{D^*}\right)+146}} \quad (9)$$

Portanto, se a eficiência de partícula com  $D = 50\mu\text{m}$  é igual a  $\eta = 0,2$ , significa que as partículas com esse diâmetro têm 20% de probabilidade de ser recolhida no *underflow*.

Por conseguinte, a eficiência global alcançada em um hidrociclone refere-se a toda distribuição granulométrica de partículas, ou seja, está associada a massa total de partículas (MASSARANI, 1986).

$$\left[ \frac{1.13n}{(0.138 + n)} \right] / \left[ 1.44 - 0.279n + \left( \frac{D'}{D^*} \right) \right] \cdot \left( \frac{D'}{D^*} \right) \quad (10)$$

$D'$  e  $D^*$  são parâmetros obtidos pelo modelo RRB (Rosin-Rammler-Bennet)

Em vista disso, hidrociclones bem projetados operam com eficiência total de remoção na faixa de 80% a 90% em relação a porcentagem de massa total (SVAROVSKY *et al.* 1984).

## 2.4 MODELOS DE HIDROCICLONES

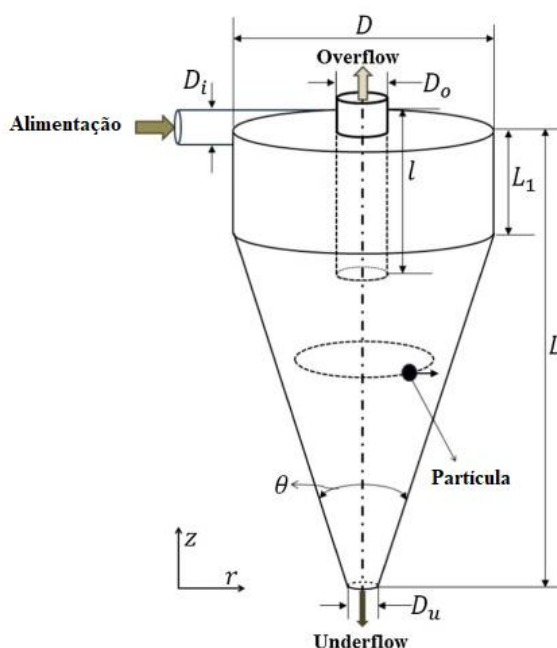
Dependendo da aplicação, os separadores centrífugos podem ser preenchidos com partículas sólidas, gases ou líquidos, em diferentes concentrações relativas. Portanto, a geometria e as condições de operação precisam ser cuidadosamente escolhidas de modo a assegurar o melhor desempenho possível.

Dessa forma, será abordada nos itens abaixo, primeiramente, a geometria de hidrociclones convencionais e cone-cilíndrico com uma única entrada tangencial, assim como alguns modelos especializados para separação líquido-líquido e líquido-gás. O efeito de cada uma das medidas proporcionais sobre o desempenho do ciclone é de intrínseca importância, assim como, o ângulo de cone ( $\theta$ ) é considerado como a principal variável de projeto.

### 2.4.1 Geometria de hidrociclone convencional de ângulo estreito e largo

É o mais utilizado na indústria e caracteriza-se por um comprimento do corpo do ciclone relativamente longo, de quatro a sete vezes o diâmetro do corpo ( $D$ ) ou mais, com um ângulo ( $\theta$ ) na parte cônica aproximadamente de  $25^\circ$ . Tais ciclones são adequados para clarificação de

líquido e, também, são usados para classificação de sólidos, onde os tamanhos de corte baixos são necessários. As características de projeto acima mencionadas são muitas vezes acompanhadas por pequenas dimensões relativas dos orifícios de entrada e do *overflow*, como observa-se na Fig. (4) abaixo, na qual é característica dos hidrociclones de alta eficiência (ANDRADE, 2007).



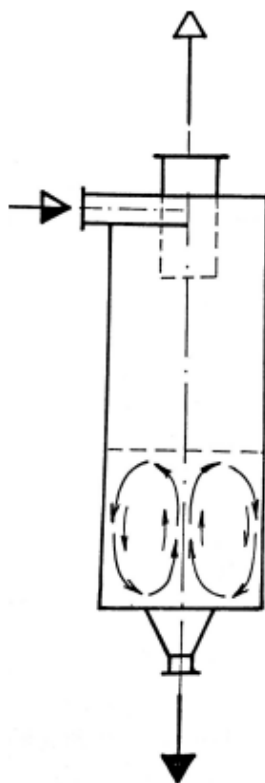
**Figura 4.** Hidrociclone convencional. Fonte: Adaptada de (SABBAGH et al. 2015)

Quanto ao grupo de ciclones convencionais com ângulo largo é geralmente menores que os descritos anteriormente e o ângulo do cone ( $\theta$ ) é superior a  $25^\circ$ . Eles são usados para classificação de sólidos de acordo com a forma ou densidade da partícula (SVAROVSKY, 1984).

#### 2.4.2 Hidrociclone de fundo plano com descargas de sólidos centrais

Este tipo de ciclone de ângulo largo, na qual possui um ângulo de cone de  $180^\circ$  é um ciclone sem um cone. O hidrociclone cilíndrico tem sido usado por algum tempo, particularmente como a primeira etapa no sistema de dois estágios.

Na parte inferior, o fluxo é para dentro e auxilia a descarga dos sólidos, tornando possível a descarga sem o auxílio do cone usual. O modelo mostrado abaixo, Fig. (5), tem uma descarga central de sólidos (SHEAU, 2001).



**Figura 5.** Hidrociclone de fundo largo. Fonte: (SVAROVSKY,1984).

### 2.4.3 Hidrociclone para separação líquido-líquido

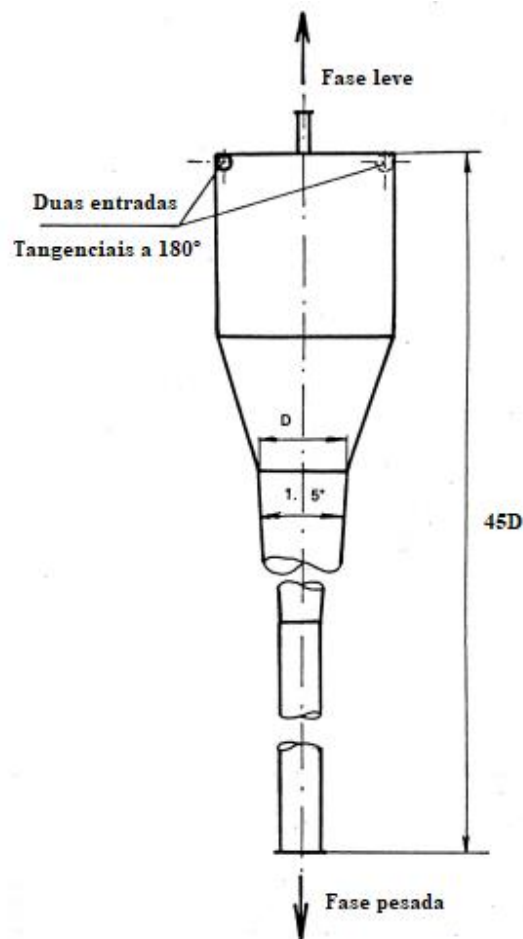
A geometria dos hidrociclones para a separação líquido-líquido permite evitar a emulsificação das gotículas da fase dispersa nos gradientes de velocidade íngremes do fluxo, assim como romper, tensão de cisalhamento de pico por turbulência transiente (MARINS *et al.* 2010).

Portanto, dois modelos de geometria diferentes foram desenvolvidos por Thew. Um para dispersões de líquidos leves a concentrações relativamente baixas em outro líquido (exemplo óleo em água), na qual é o foco deste trabalho e outro para dispersões de líquidos pesados em concentrações para até 30% em outro líquido (exemplo água em querosene) (HUSVEG *et al.* 2007).

No hidrociclone para separação líquido-líquido, a alimentação que contém a mistura entra através de entradas duplas tangenciais. O tempo de residência adequado sem muita queda de pressão é alcançado em uma seção muito longa do corpo do ciclone que é parcialmente cônica (com um ângulo muito pequeno em cerca de  $1,5^\circ$ ) e parcialmente cilíndrica. O estreitamento gradual da seção cônica promove um fluxo de vórtice interno de pequeno diâmetro, uma vez que apenas uma pequena fração do fluxo de alimentação é destinada a formar

um núcleo no centro (onde a fase leve se concentra) e sai através do *vortex finder* (SVAROVSKY, 1984).

Na separação de água e óleo, a geometria da Fig. (6) é capaz de separar até 97% do óleo na alimentação, para tamanho de corte abaixo de  $10\mu\text{m}$ . Este desempenho é substancialmente independente da concentração de alimentação de até 3% (SHEAU, 2001).



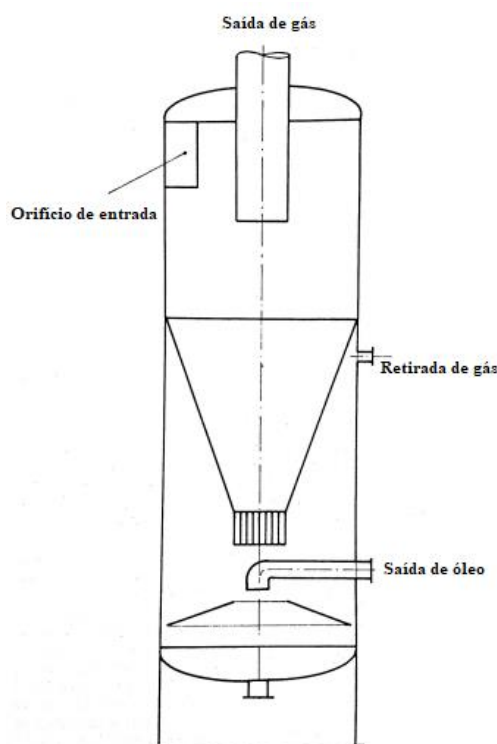
**Figura 6.** Hidrociclone para separação líquido-líquido. Fonte: Adaptado de (SVAROVSKY, 1984).

Uma característica significativa para o funcionamento deste ciclone é a supressão do núcleo do gás que é considerado necessário por Thew, para uma melhor estabilidade do vórtice pela contrapressão e também pela diferença na queda de pressão entre a alimentação e as duas saídas, na qual a queda de pressão medida no *overflow* é cerca de duas vezes a queda de pressão medida no *underflow* (SVAROVSKY, 1984).



#### 2.4.4 Ciclone líquido para separação de gás

A existência de baixa pressão no núcleo do fluxo de ciclone fornece um excelente meio para desgaseificação de líquidos por hidrociclones. A aplicação comercial mais importante para isso é a desgaseificação de petróleo bruto em plataformas de petróleo *offshore*, onde o espaço é reduzido. O hidrociclone convencional foi modificado e desenvolvido para este fim para substituir os grandes separadores de gravidade usados convencionalmente (ANDRADE, 2007).



**Figura 7.** Hidrociclone para separação de gás. Fonte: (SVAROVSKY,1984).

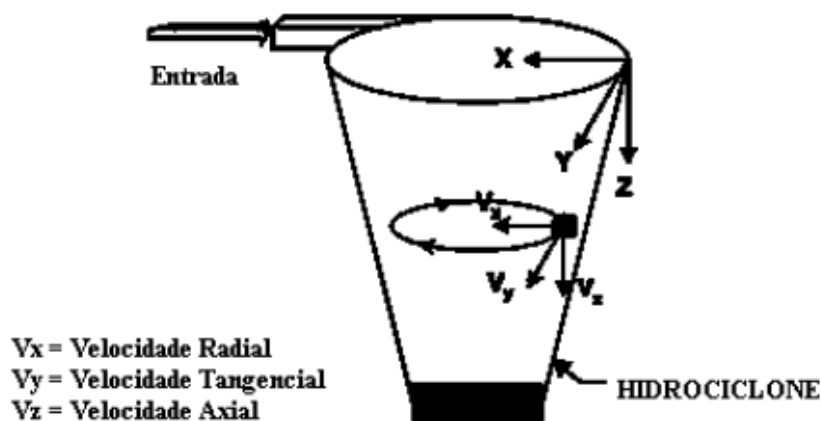
O modelo dessa geometria, mostrado na Fig. (7) acima, apresenta uma única entrada tangencial, equipada com uma disposição especial que permite o controle da velocidade de entrada.

O *vortex finder* é mais amplo do que na maioria dos hidrociclones, o ângulo do cone é pequeno e o orifício do *underflow* é largo. Assim, o gás é purgado do *vortex finder*, enquanto o óleo reporta para o *underflow*. Verificou-se por meio de testes que este tipo de hidrociclone era consideravelmente mais eficiente que o separador de gravidade convencional (SVAROVSKY, 1984).

## 2.5 VELOCIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO EM UM HIDROCICLONE

O processo de separação de um hidrociclone baseia-se no efeito das forças centrífugas criadas no corpo do ciclone. Em contraste com as centrífugas de sedimentação, os hidrociclones não possuem peças rotativas e o vórtice é produzido pelo bombeando do fluido através de uma entrada tangencial que é circular ou retangular e na qual adentra o corpo cilíndrico com cone.

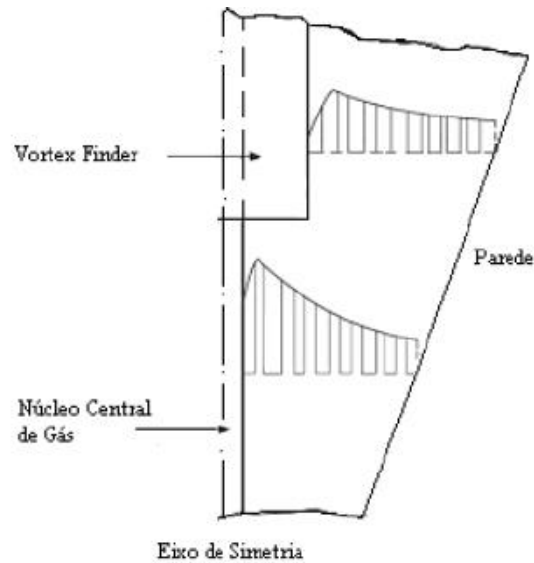
A velocidade do fluxo em um hidrociclone pode ser convenientemente resolvida em três componentes: tangencial, axial e radial, como exemplifica a Fig. (8) abaixo. O conhecimento das distribuições de velocidade dentro do escoamento é de suma importância para construir um modelo teórico do processo de separação, assim como, para simular trajetórias de partículas a partir das quais previsões de eficiência teórica poderão ser realizadas (MEDRONHO,2004).



**Figura 8.** Componentes de velocidade de um hidrociclone. Fonte: (COELHO, 2011)

Devido ao escoamento turbilhonar nos hidrociclones, a pressão estática aumenta radialmente para fora. Esta é determinada principalmente pela distribuição das velocidades tangenciais no escoamento e constitui a maior contribuição à queda total de pressão através de um hidrociclone em operação.

Como consequência, as distribuições de velocidade tangencial podem ser estimadas através de medidas simples de pressão estática radial. Assim, como mostra a Fig. (9) abaixo, a velocidade tangencial aumenta a partir da parede com o decréscimo do raio, passando então, por um máximo, diminuindo na direção do núcleo central (ALMEIDA,2009).



**Figura 9.** Distribuição de velocidade tangencial em um hidrociclone. Fonte:  
(SVAROVSKY,1984)

Portanto, as distribuições de velocidade tangencial podem ser estimadas a partir de medidas simples da pressão estática radial. Desse modo, uma expressão que relaciona a velocidade tangencial  $v$  com a distribuição da pressão radial, assumindo que o componente de velocidade radial é insignificante em relação ao componente tangencial, na qual é dada por (SVAROVSKY,1984):

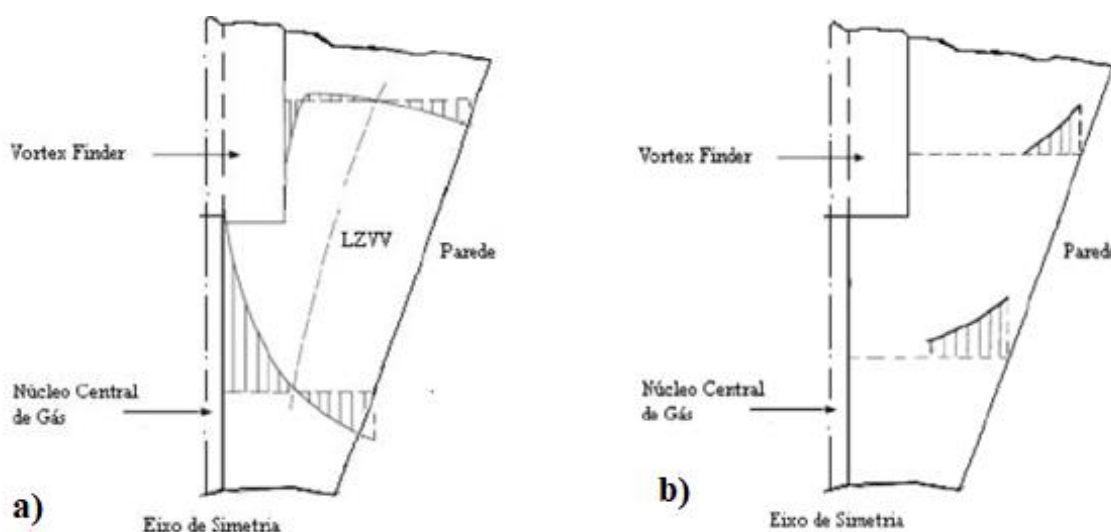
$$\frac{(v_t)^2}{r} = \frac{dp}{\rho \cdot dr} \quad (11)$$

Esta relação descrita na Eq. (11) acima foi utilizada para calcular as velocidades tangenciais das medidas de pressão estática em diferentes locais dentro de hidrociclones que correm com líquidos descontaminado. Assim sendo, a expressão descrita na Eq. (12), relaciona a expressão geral para perfis de velocidade tangencial no vórtice exterior (SVAROVSKY,1984):

$$v_t \cdot r^n = const \quad (12)$$

Na qual ( $n$ ) é um expoente empírico, geralmente entre 0,5 e 0,6. Os perfis de velocidade tangencial relativamente íngremes, descritos pela Eq. (12) acima, são tomados como evidência de baixos níveis de turbulência e, conseqüentemente, o fluxo em hidrociclone às vezes é referido como "quase laminar". (SVAROVSKY,1984).

Em um hidrociclone, a velocidade tangencial aumenta com o raio decrescente, conforme previsto pela Eq. (12). Por conseguinte, a velocidade axial tanto na porção cônica quanto na cilíndrica apresenta um fluxo descendente próximo à parede. Já na região central, o fluxo é ascendente. A velocidade radial é decrescente com o decréscimo do raio, e acima da borda do *vortex finder*. Próximo ao topo do hidrociclone há intensas velocidades radiais em direção ao centro e à base do *vortex finder*, como mostra a Fig. (9) abaixo (SHEID *et al.* 2011):



**Figura 10. a)** Distribuição do perfil de velocidade axial. **b)** Distribuição do perfil de velocidade radial. Fonte: (SVAROVSKY, 1984)

Como fundamento científico para elaboração deste trabalho, para estudo de hidrociclone para separação líquido-líquido em questão, Marins *et al.* (2010) em seu trabalho realizaram testes experimentais para analisar o escoamento em um hidrociclone projetado para separação líquido-líquido, operando em fluxo monofásico. São técnicas de medição utilizada para em que os autores obtiveram os perfis de velocidade através das técnicas LDA (*Laser Doppler Anemometer*) e PIV (*Particle Image Velocimetry*), na qual essas técnicas utilizam princípios óticos de medição a laser.

## 2.6 MODELOS MATEMÁTICOS

Um modelo matemático ou simplesmente modelo, pode ser apresentado como uma representação de um sistema real. O objetivo mais importante de um modelo é que ele permite aproximar-se do mundo real.

Um modelo matemático consiste de um conjunto de equações que representam de uma forma quantitativa, as hipóteses que foram usadas na construção do modelo, as quais se apoiam sobre o sistema real. Tais equações são resolvidas em função de alguns valores conhecidos ou previstos pelo modelo real e podem ser testadas através da comparação com os dados conhecidos ou previstos com as medidas realizadas no mundo real.

As equações matemáticas de um modelo não proporcionam a própria explicação científica, mas simplesmente interpretam as hipóteses de um ponto de vista quantitativo, dando-nos a condição de deduzir consequências e mostrar-nos onde estão os detalhes que deverão ser aceitos ou recusados.

As leis físicas de conservação de massa e de quantidade de movimento são as equações básicas que descrevem os fenômenos relacionados com escoamento de fluidos, logo a equação da continuidade é dada por (MORANDIM, 1999):

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho)}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

Ou na forma de notação vetorial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (14)$$

Na qual para fluidos incompressíveis, temos que :

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (15)$$

A equação da conservação da quantidade de movimento, também conhecida como equação do movimento, é obtida através do somatório das forças que atuam em um elemento de volume do volume de controle, na qual é dada pela Eq. (16) abaixo:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \nabla P - \nabla \tau + \rho \mathbf{g} \quad (16)$$

Portanto para um fluido newtoniano incompressível e com viscosidade constante, na qual simplificando a Eq. (16), obtém-se a equação de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \nabla P - \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (17)$$

### 2.6.1 Modelo de turbulência

Os escoamentos turbulentos são caracterizados pela flutuação da velocidade do fluido no tempo e no espaço. As equações de Navier-Stokes são capazes de modelar escoamentos em qualquer regime e em qualquer valor do número de Reynolds, porém quanto maior o número de Reynolds, mais largo se torna o espectro de energia associado ao escoamento (ALMEIDA,2008).

O modelo de turbulência é usado na solução numérica das equações de Navier Stokes, permitindo a simulação de aspectos importantes de escoamentos turbulentos encontrados em engenharias.

Assim, um modelo de turbulência é um conjunto de equações, expressões, e coeficientes empíricos que permitem a determinação dos termos extras oriundos das equações RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*). O escoamento turbulento é sempre tridimensional e transiente, caracterizando-se pela presença de vórtices com uma larga faixa de escalas de comprimentos (ARAÚJO,2015).

A escolha de modelos de turbulência depende de algumas considerações: as características norteadoras do escoamento, a prática estabelecida para uma específica classe de problema, o nível de precisão requerido, a disponibilidade dos recursos computacionais, assim como o total de tempo disponível para simulação (ALVES,2012).

Os modelos de turbulência disponíveis e empregados para a solução dos problemas de engenharia são (COELHO,2009):

- Modelos algébricos
- Modelos diferenciais de duas equações
- Modelos diferenciais de quatro equações ( $k$ - $\epsilon$  de múltipla escala)
- Modelos que não utilizam o conceito de viscosidade turbulenta (modelos de tensão de Reynolds ou Reynold Stress Model - RSM).

Desse modo, o presente trabalho utiliza como modelo de turbulência, o modelo de tensão de Reynolds (RSM) para modelagem e simulação do escoamento no hidrociclone proposto em estudo. Por conseguinte, o modelo RSM (Reynolds Stress Model) que desconsidera a hipótese de isotropia do escoamento e possui um maior potencial para modelar escoamentos em geometrias complexas. Portanto, é o modelo mais utilizado para simulações em hidrociclone, devido à complexidade do escoamento.

Esses modelos podem ser apresentados sob a forma algébrica ou diferencial. Na forma diferencial as equações são resolvidas individualmente para cada componente da tensão de Reynolds, representada pela Eq. (18) abaixo (MORADIN,1999):

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} \otimes \mathbf{V}) - \nabla \cdot \left( \rho C \frac{k}{\varepsilon} \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} (\mathbf{v} \otimes \mathbf{v})^T \right) = P + G + \overline{\phi} - \frac{2}{3} \rho \varepsilon \delta \quad (18)$$

G: Produção de turbulência devido a empuxo;

$\overline{\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}}$ : Contribuição da flutuação das tensões de Reynolds;

P: Produção de turbulência devido ao cisalhamento;

$\overline{\phi}$ : Correlação pressão-deformação;

### 2.6.2 Abordagem Euleriana

Consiste em uma abordagem média ponderada pela massa onde os fluidos presentes são matematicamente considerados como meios contínuos e que não há transferência interfacial de massa entre as fases (SOUZA *et al.*2015).

Assim, as equações médias de conservação de massa, momento e energia são resolvidas para todas as fases e integradas para prever as propriedades volumétricas médias do campo. Esta modelagem é robusta, porém é mais custosa computacionalmente.

### 2.6.3 Abordagem Lagrangeana

Nessa abordagem, a fase contínua é modelada pela resolução das equações médias de Navier-Stokes (RANS). A fase contínua é tratada utilizando o método de volumes finitos enquanto o movimento das gotas é resolvido acompanhando-se muitos *parcels* (partículas representando um pequeno grupo de partículas/gotas/bolhas com as mesmas características) pelo domínio (MEDRONHO,2015).

Cada partícula é simulada com base na segunda lei de Newton para o movimento e no cálculo das forças atuantes sobre a mesma, considerando as interações com o fluido ou outras partículas (colisões). A trajetória da partícula é calculada baseada no balanço de forças na partícula e influenciado pelo escoamento da fase fluida, tais como o campo de escoamento e a turbulência (SHEID *et al.*2015).

Portanto, a solução do movimento da fase fluida discreta é obtida calculando-se a velocidade local do grupo de partículas na posição atual e um passo de tempo de referência, mostrada na Eq. (19) abaixo (DIBB,1997):

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} |(\mu_i - v_i)| + \frac{F_i}{m_p} \quad (19)$$

$V_i$  : a velocidade da fase fluida discreta (Lagrangeana)

$F_i$  : a soma das forças na direção i

$C_D$  :o coeficiente de arraste

$m_p$  :a massa da gota

$\rho_p$  :a densidade da fase fluida discreta e  $d_p$  o diâmetro da gota

## 2.7 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

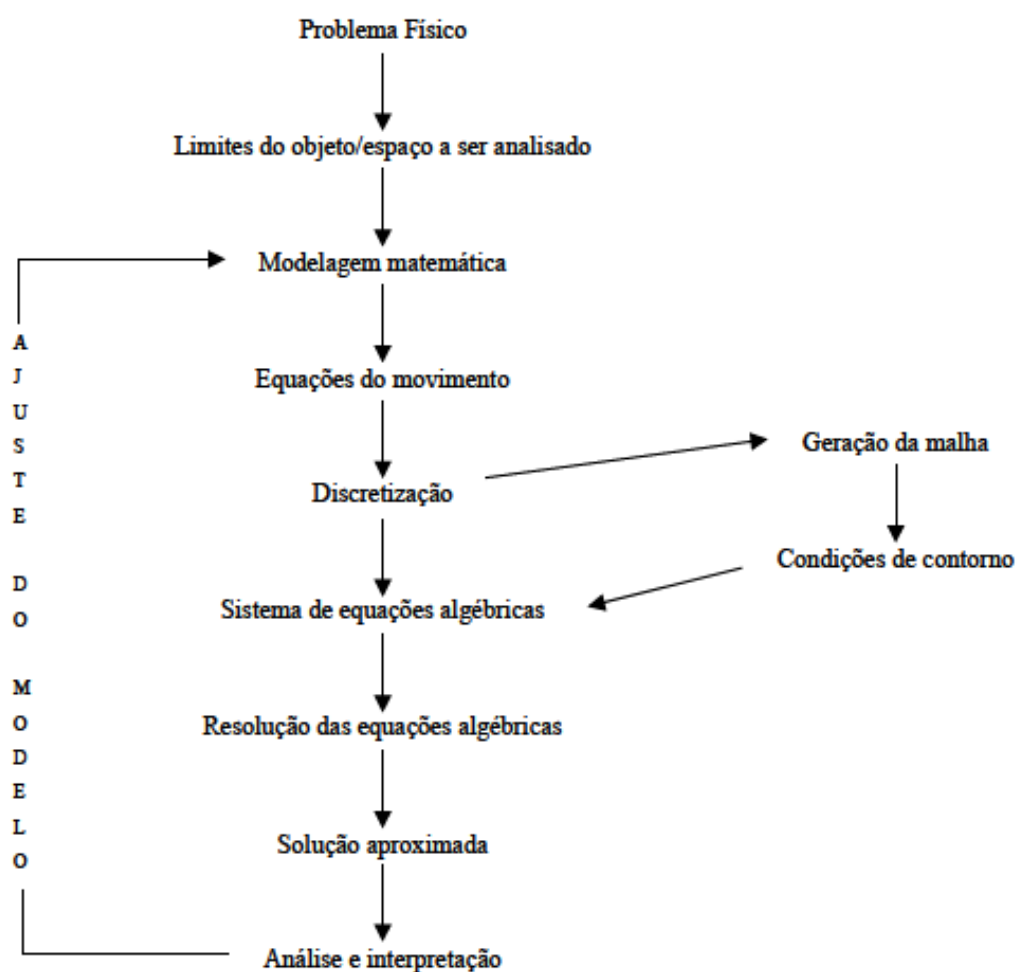
A fluidodinâmica computacional, CFD (*Computational fluid dynamics*), é o estudo dos fenômenos de transporte que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor, transporte de massa e reações químicas, utilizando métodos matemáticos, numéricos e computacionais (MORADIN,1999).

CFD atua, portanto, como ferramenta para a obtenção de soluções numéricas completas que permitem a predição de fenômenos como a reversão de escoamento, o escoamento de alta vorticidade, a existência de zonas de recirculação e, etc (LIN *et al.*2013).

Ao se iniciar um projeto de CFD, deve-se avaliar o problema para se saber quais são as variáveis mais importantes no processo e quais podem ser simplificadas ou até mesmo descartadas. Nesta etapa, determina-se quais grandezas físicas atuam e como elas afetam o problema (AMARAL,2008).

Em geral, uma simulação em CFD pode ser dividida em basicamente três etapas principais: pré-processamento, processamento e pós-processamento, como mostra o esquemático da Fig. (11) abaixo:





**Figura 11.** Esquemático de soluções de problemas em CFD. Fonte: (Leahy-Dios, 2003).

Para tratar o modelo computacionalmente, é necessário expressar de forma adequada as equações e a região (volume de controle). Como não é possível obter soluções numéricas sobre uma região contínua devido aos infinitos pontos da mesma, inicialmente o domínio é discretizado, isto é, é dividido em um número finito de pontos (nós), onde as equações são calculadas. Somente nesses pontos as soluções serão obtidas (ALMEIDA, 2008).

### 3.0 METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado por meio de simulações numéricas computacionais através do *software* ANSYS® (18.1), utilizando-se o programa *Fluent* para estudo fluidodinâmico computacional (CFD). As simulações obtidas foram analisadas quanto ao perfil de velocidade tangencial, radial e axial, assim quanto a análise da distribuição de pressão no interior do hidrociclone, trajetória das linhas de corrente e verificada a eficiência de separação fracionada da parte dispersa (óleo) da água.

Realizou-se uma etapa de teste de malhas para garantir a utilização de modelagem adequada. Desta forma, buscou-se na literatura artigos com configuração e geometria próximas às utilizadas neste trabalho e que possuísem dados e condições de contorno bem definidas, na qual são parâmetros fundamentais para caracterizar o escoamento.

#### 3.1 GEOMETRIA DO HIDROCICLONE

Portanto, antes de iniciar o processo de simulação no programa, foi construído a geometria do hidrociclone para separação água-óleo no *software Solidworks*®, na qual foram usadas as devidas dimensões com base no trabalho experimental de Marins *et al.* (2010) que utiliza o clássico hidrociclone desenvolvido por K. Nezhati e M. T. Thew, (1987), específico para este tipo de separação. Assim como, as dimensões foram obtidas e comparadas com base na observação das proporções geométricas corretas, disponíveis na literatura.

Como mencionado anteriormente Marins *et al.* (2010) realizou testes experimentais em seu trabalho para analisar o escoamento em um hidrociclone projetado para separação líquido-líquido. Manuseando-se para isso das técnicas LDA (*Laser Doppler Anemometer*) e PIV (*Particle Image Velocimetry*) que utilizam princípios óticos de medição a laser, na qual os autores obtiveram os perfis de velocidade.

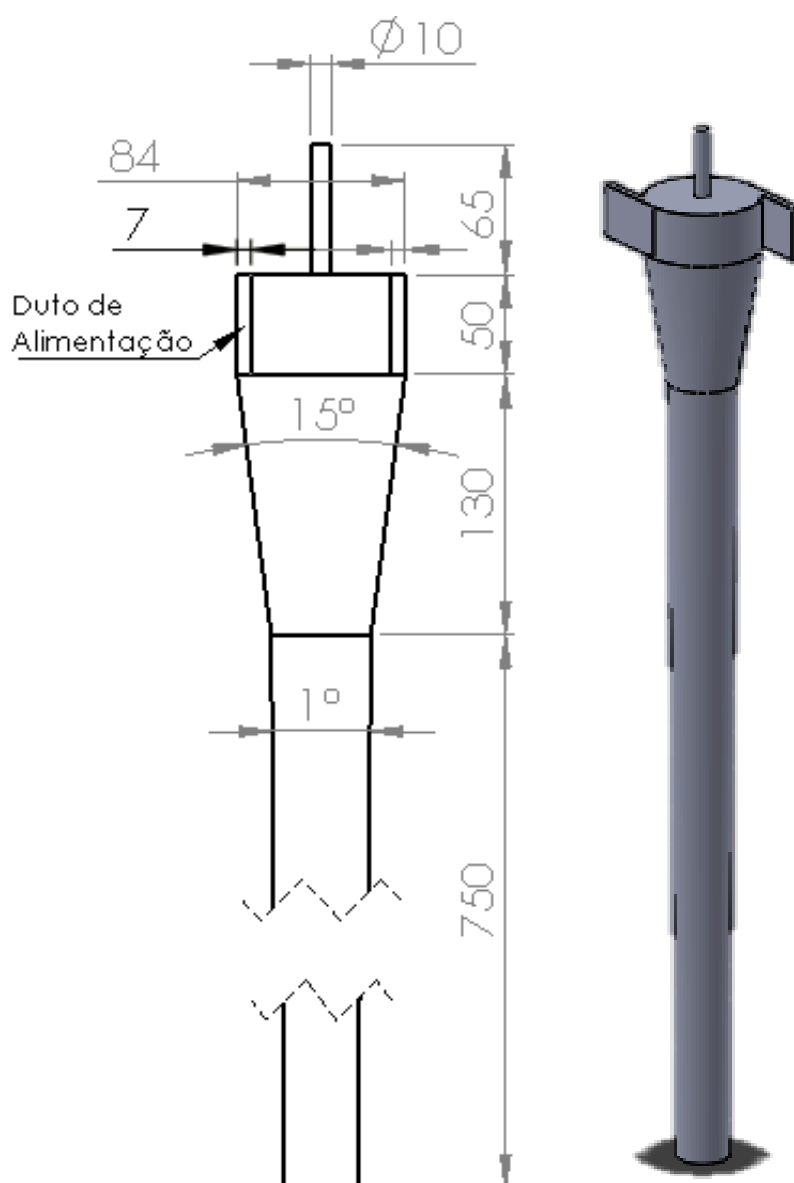
A geometria do hidrociclone utilizado por Marins *et al.* (2010) foi especialmente desenvolvido para aplicação na indústria do petróleo e tem como principais características a presença de dois dutos retangulares na alimentação, na qual a seção de entrada é composta por uma parte cilíndrica e logo abaixo por uma seção cônica com um ângulo de inclinação de 15 °.

Esta configuração proporciona uma aceleração gradual do fluxo, resultando em maior queda de pressão e redução de turbulência. Assim como, é observado um pequeno ângulo com inclinação de 1° na parte cônica-cilíndrica, pois para a separação de água e óleo, a diferença de

densidade dos fluidos é pequena, fazendo-se necessário que o tempo de residência seja maximizado com o uso de um pequeno ângulo de inclinação ao longo do corpo do hidrociclone.

Ademais, Marins *et al.* (2010) afirma em seu trabalho que os dados e metodologia utilizados são precisos o suficiente para servirem como dados de referência para a validação de simulações numéricas desse tipo.

E como mencionado anteriormente, o desempenho de um hidrociclone é, principalmente, influenciado pela geometria do equipamento e entre outros fatores. A Fig. (12) e a Tabela (2) mostram as dimensões da geometria do hidrociclone utilizados nas simulações de escoamento no presente trabalho:



**Figura 12.** Medidas da geometria do hidrociclone simulado e sua modelagem tridimensional.

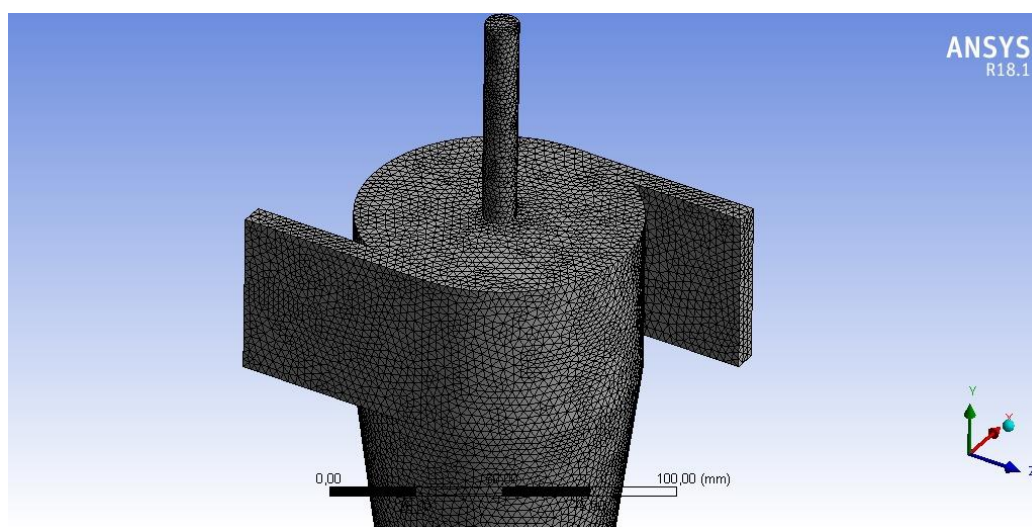
Fonte: Elaboração Própria

**Tabela 2.** Dimensões do Hidrociclone.

DIMENSÕES	(mm)
Diâmetro do overflow ( $D_o$ )	10
Diâmetro do cilindro ( $D$ )	84
Diâmetro do underflow ( $D_u$ )	26
Comprimento do tudo da saída do concentrado ( $l$ )	65
Comprimento da seção cônica ( $L_2$ )	130
Comprimento da seção cônica-cilíndrica ( $L$ )	750
Comprimento da seção cilíndrica ( $L_1$ )	50
Largura do duto de alimentação ( $D_i$ )	7
ÂNGULOS DA PARTE CÔNICA	(GRAU: °)
Primeira parte cônica	15°
Segunda parte cônica-cilíndrica	1°

### 3.2 GERAÇÃO E TESTE DE MALHA

Foi criada a malha pelo programa ANSYS *meshing*® (18.1), como mostra a Fig. (13), na qual foi realizado um teste de malha com refinamento da mesma para 500000 elementos, outra com 700000 e a última com 900000 elementos. As malhas foram mais refinadas na região das paredes (camada limite) por serem regiões onde ocorrem elevados gradientes de pressão e velocidade e na região central (*vortex core*).

**Figura 13.** Geração de malha na geometria do hidrociclone. Fonte: Elaboração Própria

Os testes foram realizados em escoamento monofásico, apenas água (fase contínua) foi utilizada como fluido. O modelo de turbulência empregado, como já mencionado, foi o RSM (*Reynolds Stress Model*)

As simulações foram realizadas definindo-se as regiões de contorno do hidrociclone com bases nas condições dadas no experimento de Marins *et al.* (2010), mostrada na Tab. (3) abaixo, para a entrada, *overflow* e *underflow*.

A condição de contorno selecionada para a entrada foi velocidade do fluido (*velocity inlet*) e para as saídas foi utilizada a pressão na saída (*pressure outlet*). Ao se utilizar *pressure outlet* como condição de contorno no *FLUENT*, o fluido tem a possibilidade de entrar ou sair do volume de controle de acordo com as condições do escoamento naquela região.

**Tabela 3.** Condições de contorno para simulação

CONDIÇÕES DE CONTORNO	
Pressão de entrada	3.02 bar
Pressão no overflow	1.20 bar
Pressão no underflow	2.05 bar
Tempo de residência	1.5 s
Número de Reynolds	89500
DPR (queda de pressão)	1.87

### 3.3 SIMULAÇÃO BIFÁSICA

A simulação bifásica foi realizada utilizando óleo e água e o modelo utilizado foi o lagrangeano com as condições de contorno na Tab. (4) abaixo. Nesse modelo foram utilizada a função *Discrete Phase Model* do software *Fluent*. Essa função permite a utilização de distribuições de partículas para o cálculo das trajetórias das partículas, e assim calcular as eficiências.

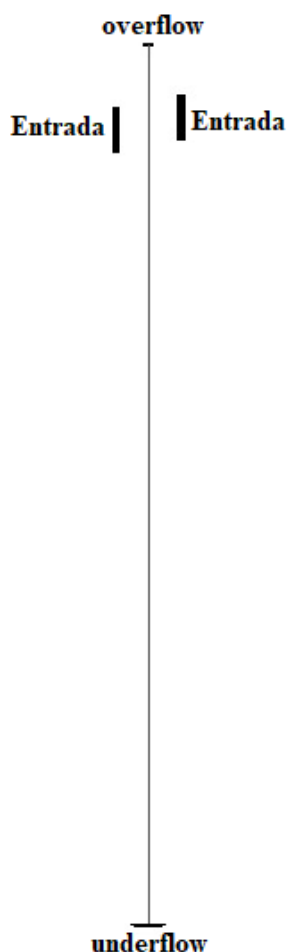
**Tabela 4.** Condições de contorno para a simulação bifásica

<b>Velocidade na entrada</b>	3.67 m/s
<b>Pressão na entrada</b>	3.02 bar
<b>Fase aquosa</b>	Contínua
<b>Densidade da água</b>	998.2kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidade da água</b>	0.001003 kg/(m.s)
<b>Fase oleosa</b>	Dispersa

<b>Densidade do óleo</b>	960 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidade do óleo</b>	0.048 kg/(m.s)
<b>Modelo matemático</b>	Modelo lagrangeano
<b>Modelo de turbulência</b>	RSM
<b>Regime</b>	Permanente
<b>Condição de contorno-overflow</b>	1.2 bar
<b>Condição de contorno-underflow</b>	2.05 bar

Por conseguinte, para estudo dos perfis de velocidade e de pressões, foram obtidos, também, por meio das simulações no programa, os gráficos (Plot xy), mostrados na sessão de resultados. Assim, foi possível analisar o comportamento de perfil de velocidade e de pressão ao longo da posição centro-vertical do hidrociclone.

Portanto, para realizar essa análise foi necessário elaborar uma linha de referência entre as entradas e do *overflow* até o *underflow*, mostrada na Fig. (14) abaixo:



**Figura 14.** Linha de Referência inserida no FLUENT. Fonte: Elaboração Própria

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram quanto ao teste de malha, para escolha da malha mais adequada, com base nos valores de RQP e  $R_f$ . Assim como, foram obtidos os perfis de velocidades e distribuição de pressões pela simulação e, também, os gráficos do comportamento centro-vertical do hidrociclone para esses perfis. Desse modo, e por último, foi possível calcular e analisar a eficiência de separação fracionada.

##### 4.1 RESULTADO DO TESTE DE MALHAS

As simulações realizadas para o teste de malha foram obtidas em escoamento monofásico, ou seja, somente com água.

O hidrociclone do experimento de (Marins *et al.* 2010) não opera com a mesma pressão nas saídas. Este equipamento utiliza razão entre quedas de pressão RQP, como mostra a Eq. (20) abaixo. Logo, foi necessário informar a pressão nas respectivas correntes para as condições de contorno das saídas.

$$RQP = \frac{(P_e) - (P_c)}{(P_e) - (P_d)}$$

$$RQP = \frac{(3.02) - (1.2)}{(3.02) - (2.05)} = 1.87 \quad (20)$$

$P_e$  = Pressão na entrada

$P_c$  = Pressão no overflow

$P_d$  = Pressão no underflow

Logo, quanto ao resultado do teste de malha, verificou-se que com base no experimento de (Marins *et al.* 2010), os valores computacionais obtidos para razão entre quedas de pressão (RQP) foram utilizadas para comparação de malhas, mostrada na Tab. (5), com base no valor de RQP igual a 1.87, obtido experimentalmente pelos autores, e pela razão de fluido (RF), Eq. (2).

**Tabela 5.** Parâmetros para o teste de malha

	<b>Malha: 500000</b>	<b>Malha: 700000</b>	<b>Malha: 900000</b>
<b>DPR</b>	2.107	2.113	2.117
<b>RF</b>	0.294	0.293	0.292

Com base nisso, foi possível concluir que uma malha de aproximadamente 500 mil elementos era suficiente para estabilizar estes perfis de velocidade. Um teste quanto ao número de iterações mostrou serem necessárias aproximadamente 1000 iterações para malha de 500 mil elementos, 1300 para malha para a de 700 mil elementos e 1500 iterações para malha de 900 mil elementos, para estabilizar a eficiência granulométrica e a razão de fluido, além de garantir o fechamento do balanço de massa.

## 4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO BIFÁSICA

Portanto, a partir das componentes de velocidades em um hidrociclone, como mostra a Fig. (8), foi possível obter por meio da simulação bifásica (água e óleo), os perfis de velocidades e pressão, tal qual os gráficos para análise dos perfis centro-vertical (Plot xy).

A Fig. (15) mostra o perfil de pressões no hidrociclone simulado. A pressão segue o comportamento esperado para um hidrociclone, reduzindo progressivamente das paredes em direção ao centro, ou seja, a maior pressão é encontrada na região das paredes (camada limite).

O fato da pressão estática aumentar radialmente é determinado pela distribuição da velocidade tangencial no escoamento e constitui a maior contribuição à queda total de pressão (RQP) através de um hidrociclone em operação. Esse gradiente de pressão é o responsável pela separação das fases em um hidrociclone, pois a pressão menor no centro puxa a fase menos densa para essa região que é elevada ao *overflow*.

Assim como, o motivo pelo qual a intensidade turbilhonar ser maior nas proximidades da entrada tangencial está relacionada com as forças por unidade de área atuando nessa região, ou seja, as pressões. Portanto, com o aumento da queda de pressão, a eficiência da separação também aumenta.

Por conseguinte, a Fig. (16) mostra a velocidade axial, na qual percebe-se tanto na porção cônica quanto na cilíndrica apresenta um fluxo descendente próximo à parede. Já na região central, o fluxo é ascendente. Em geral, a velocidade axial é máxima na linha de centro do equipamento.

Portanto picos de velocidades axiais sobre a linha central do equipamento normalmente são bastante pronunciados e com valores positivos em regiões próximas ao *overflow*, diminuindo sua intensidade a partir do momento que se migra em direção ao orifício de *underflow*, como mostra a Fig. (16).

Desta forma, também é analisada, a velocidade radial, descrita pela Fig. (17), na qual é decrescente com o decréscimo do raio, onde próximo ao topo do hidrociclone há fortes velocidades radiais em direção ao centro. Assim, como mencionado, o aumento da velocidade



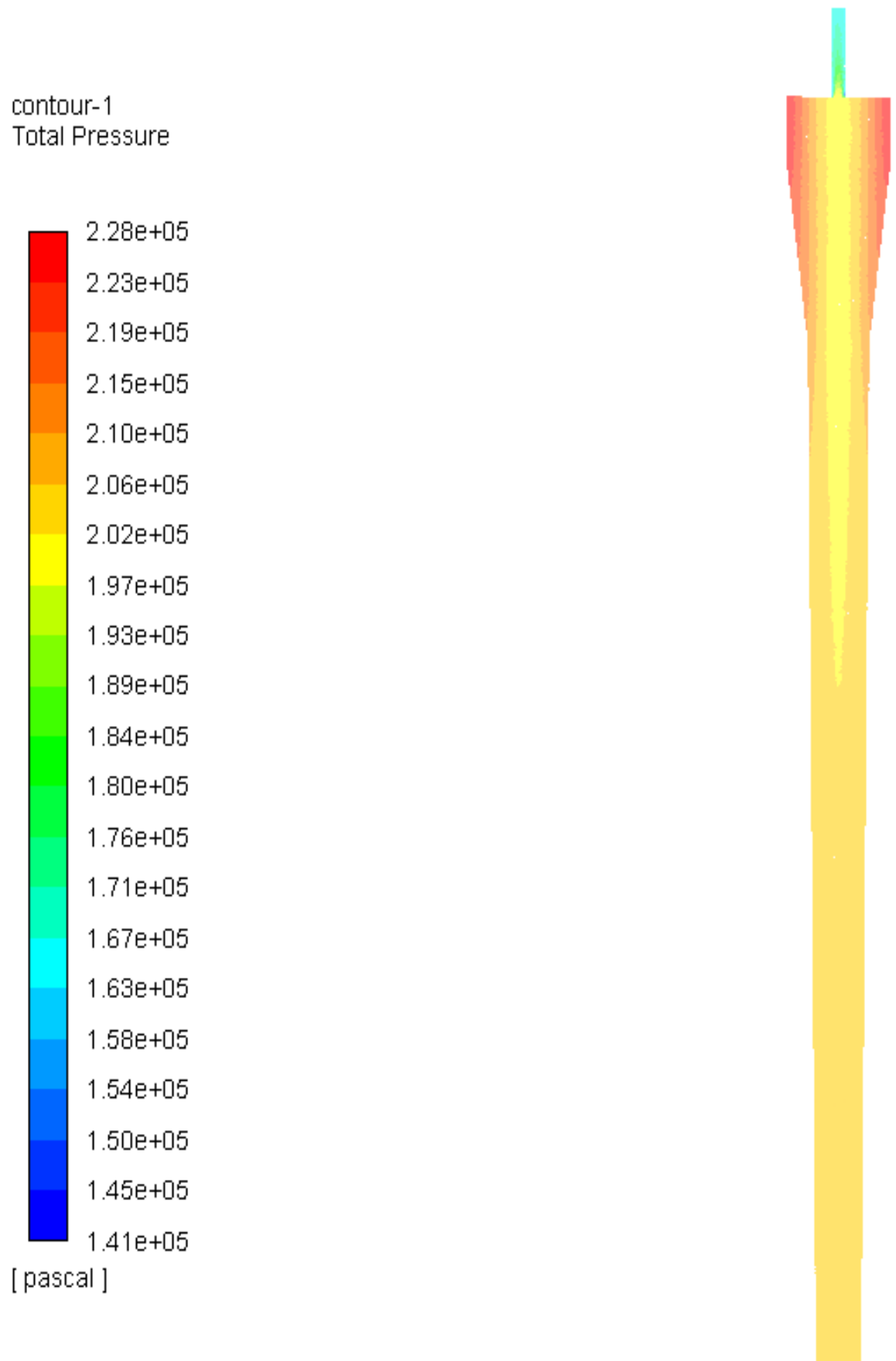
radial no vórtice secundário gera uma força centrífuga muito elevada, produzindo uma separação secundária totalmente eficiente.

Desta forma, e como a principal componente de velocidade, o perfil de velocidade tangencial, mostrada na Fig. (18), apresenta seus maiores valores próximos à região central. Portanto ela aumenta com o decréscimo do raio, como descreve a Eq. (12), atingindo um valor máximo próximo deste eixo.

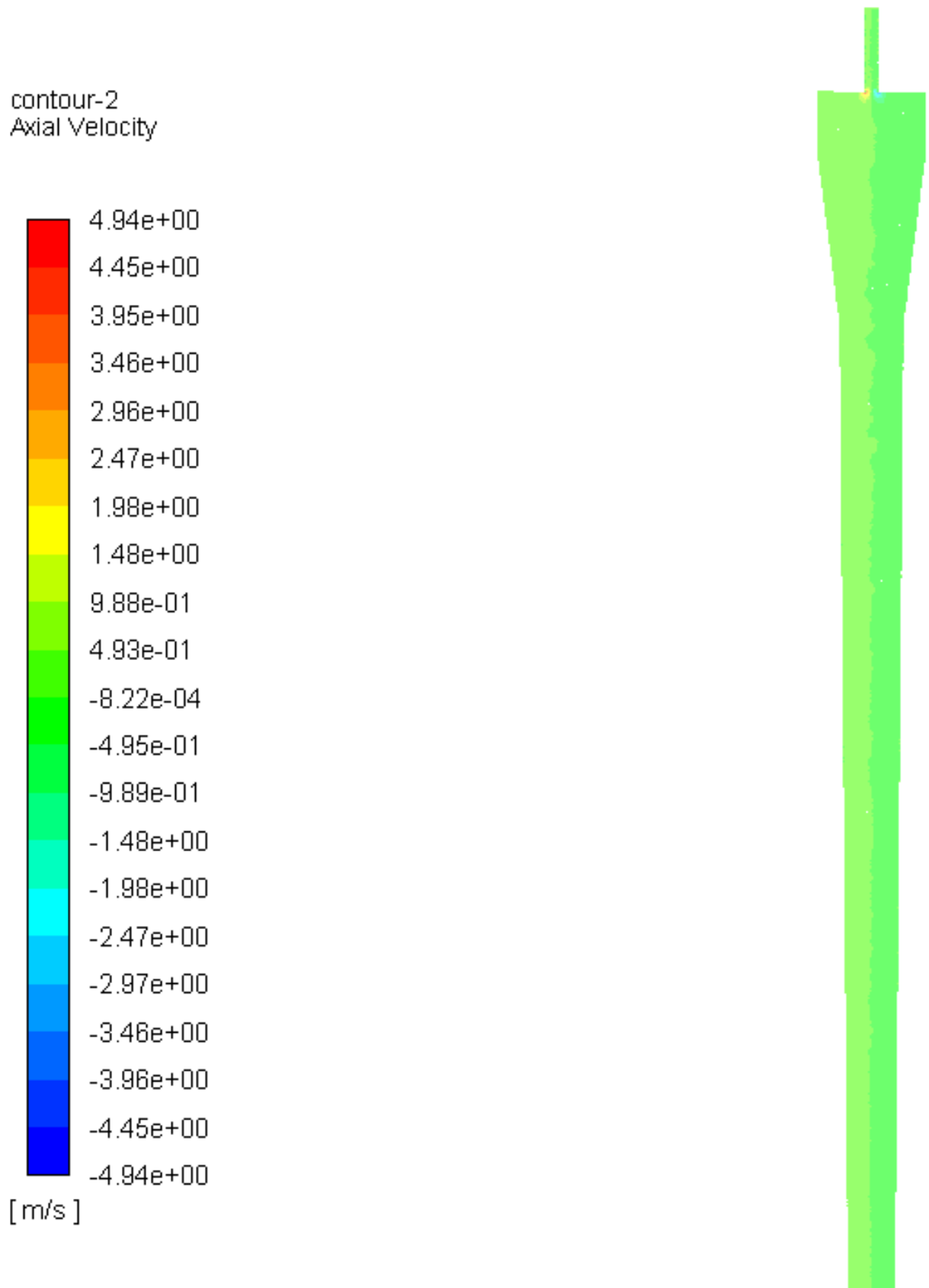
A eficiência de separação é dependente deste campo de velocidade tangencial, pois a componente tangencial é responsável pela geração das forças centrífugas e de cisalhamento atuantes em um hidrociclone.

Os perfis de velocidade são dependentes da posição angular no interior do hidrociclone, na qual as maiores intensidades turbilhonares estão situadas nas proximidades da entrada tangencial.

Sendo assim, os perfis de velocidade em um hidrociclone são muito complexos, mesmo para a água que possui baixa densidade e viscosidade, e pode-se variar os perfis para hidrociclones com geometrias consideravelmente diferentes ou para líquidos de alta viscosidade.

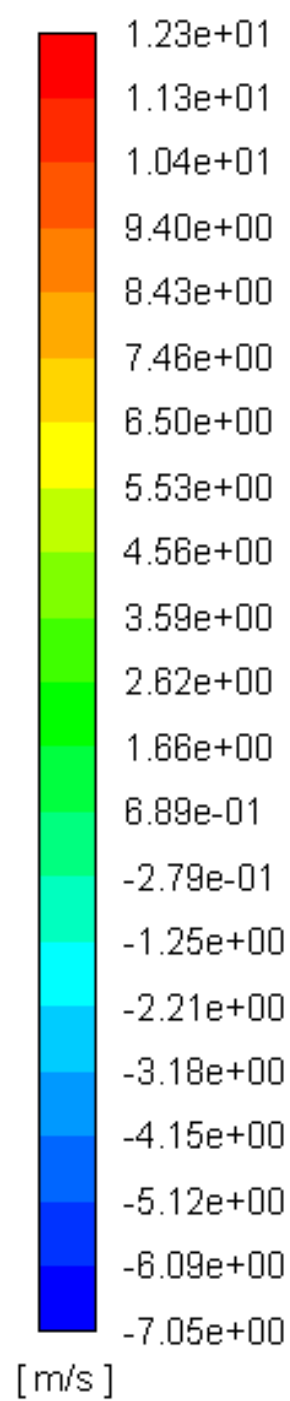


**Figura 15.** Perfil de pressão do hidrociclone simulado. Fonte: Elaboração Própria.

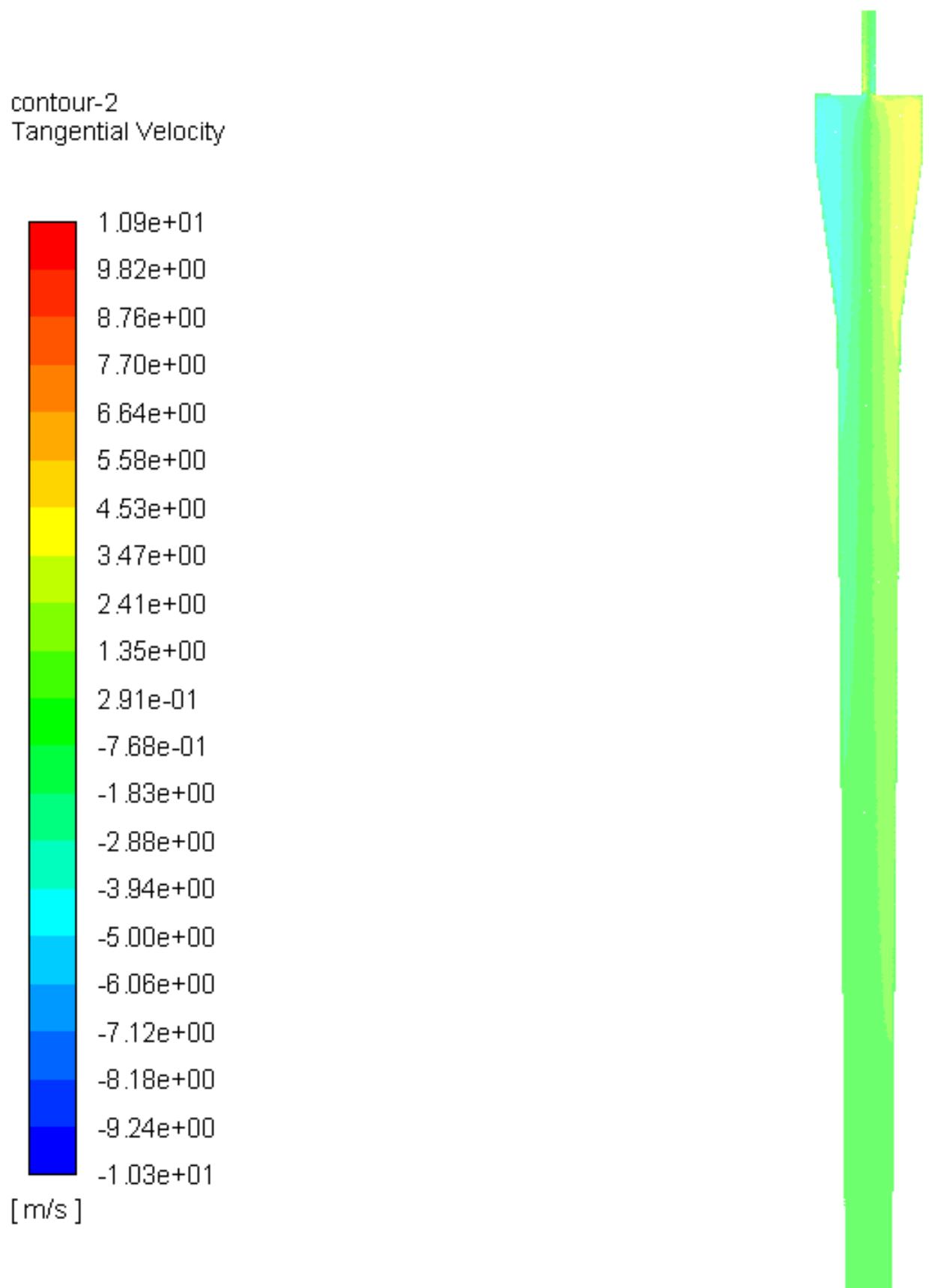


**Figura 16.** Perfil de velocidade axial no hidrociclone simulado. Fonte: Elaboração Própria

contour-2  
Radial Velocity



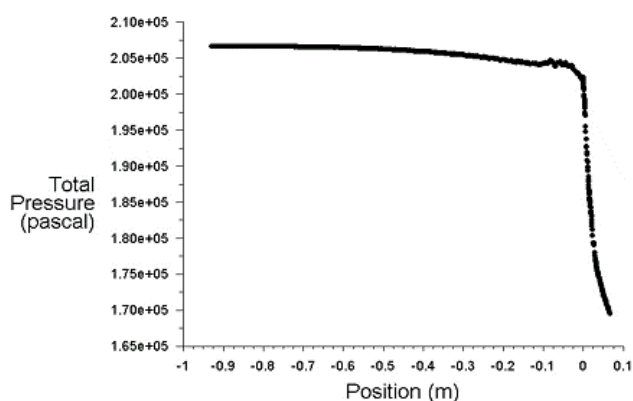
**Figura 17.** Perfil de velocidade radial no hidrociclone simulado. Fonte: Elaboração Própria.



**Figura 18.** Perfil de velocidade tangencial no hidrociclone simulado. Fonte: Elaboração Própria.

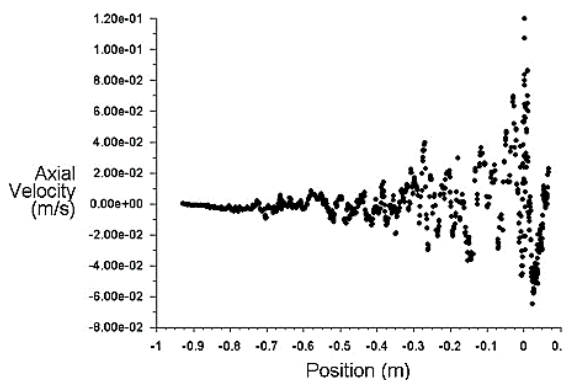
Portanto, nos gráficos abaixo são analisados o comportamento do escoamento quanto ao perfil de velocidades e pressões na posição centro-vertical do hidrociclone, em que foi inserida uma linha de referência (eixo de simetria) no centro, do *overflow* até o *underflow*. A parte positiva da abscissa é próxima da região do overflow e a região negativa próxima ao underflow

O Graf. (2) mostra a distribuição de pressão ao longo do eixo centro-vertical, na qual percebe-se que próximo à entrada, ocorre a menor pressão no interior do mesmo. Também, devido a queda de pressão no interior do hidrociclone, resulta na separação das fases (óleo e água), na qual a região de menor pressão força a saída do óleo pelo *overflow*.



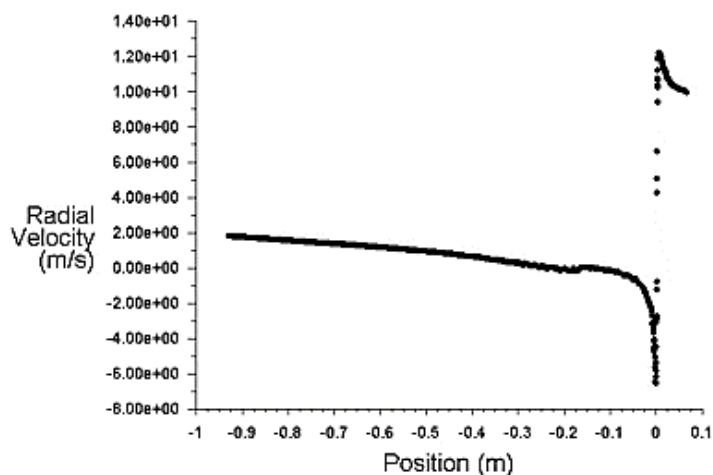
**Gráfico 2.** Perfil de pressão ao longo do eixo vertical. Elaboração Própria

O perfil de velocidades axiais na posição centro-vertical é mostrado no Graf. (5) abaixo, na qual sabe-se que na região central, o fluxo é ascendente e que a velocidade axial é máxima na linha de centro do equipamento, como mostra a Fig. (16). Portanto, percebe-se que picos de velocidades axiais sobre a linha central do equipamento são bastante pronunciados em regiões próximas ao *overflow*, diminuindo sua intensidade a partir do momento que se migra em direção ao orifício de *underflow*, como percebe-se no Graf. (3) abaixo:



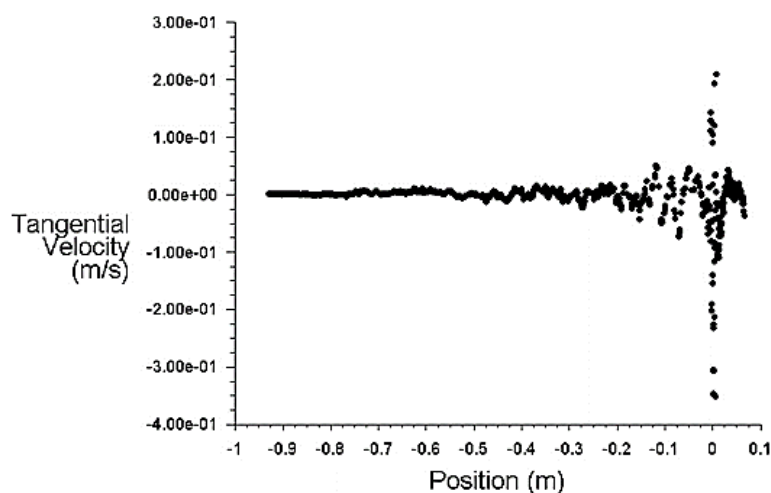
**Gráfico 3.** Perfil de velocidade axial ao longo do eixo vertical. Fonte: Elaboração Própria.

O Graf. (4) mostra o perfil de velocidades radiais ao longo do eixo centro-vertical do hidrociclone, na qual é decrescente com o decréscimo do raio, onde próximo ao topo do hidrociclone, próxima à região do *overflow*, há fortes velocidades radiais em direção ao centro, como é observado no gráfico abaixo:



**Gráfico 4.** Perfil de velocidade radial ao longo do eixo vertical. Fonte: Elaboração Própria

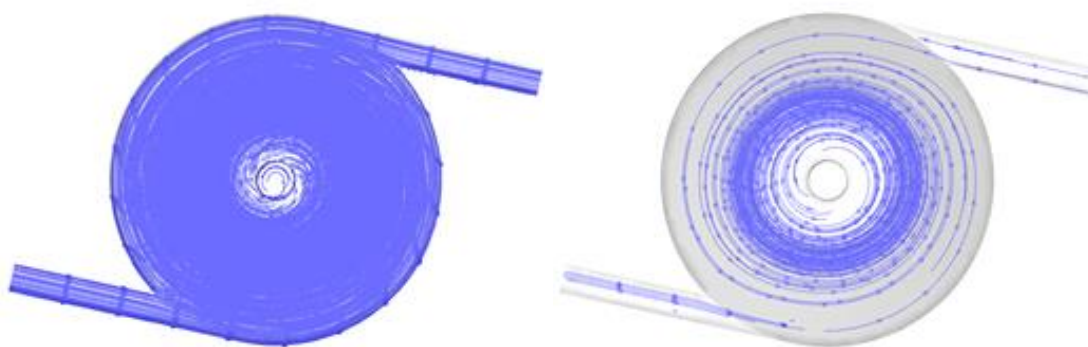
O Graf. (5) mostra o perfil de velocidades tangenciais ao longo do eixo centro-vertical do hidrociclone, na qual aumenta com o decréscimo do raio. A perfil de velocidade tangencial é razoavelmente independentemente da posição vertical. O fluido é introduzido tangencialmente com uma alimentação dotada de energia de pressão, na qual percebe-se picos de velocidade tangencial mais pronunciados na entrada, como mostra o gráfico abaixo:



**Gráfico 5.** Perfil de velocidade tangencial ao longo do eixo vertical. Fonte: Elaboração Própria.

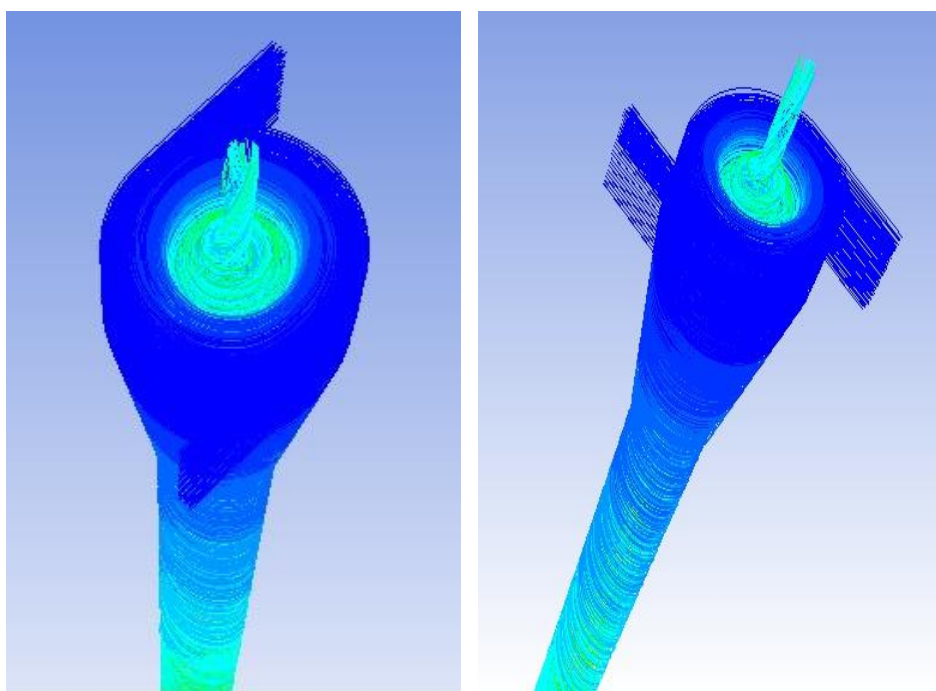
A Fig. (19) apresenta as linhas de corrente obtidas pela simulação, mostrando os caminhos percorridos pelo fluido no interior do hidrociclone. É possível visualizar o caminho espiralado descendente, próximo à parede e o espiralado ascendente, na região central.

Observa-se, também, por meio da simulação que o caminho percorrido pelo óleo corre devido a pressão menor no *vortex core*, na qual as partículas de óleo que são menos densas são empurradas para essa região, e o movimento ascendente faz com que o óleo saia pelo *overflow* (saída superior).



**Figura 19.** Linhas de corrente do escoamento. Fonte: Elaboração Própria

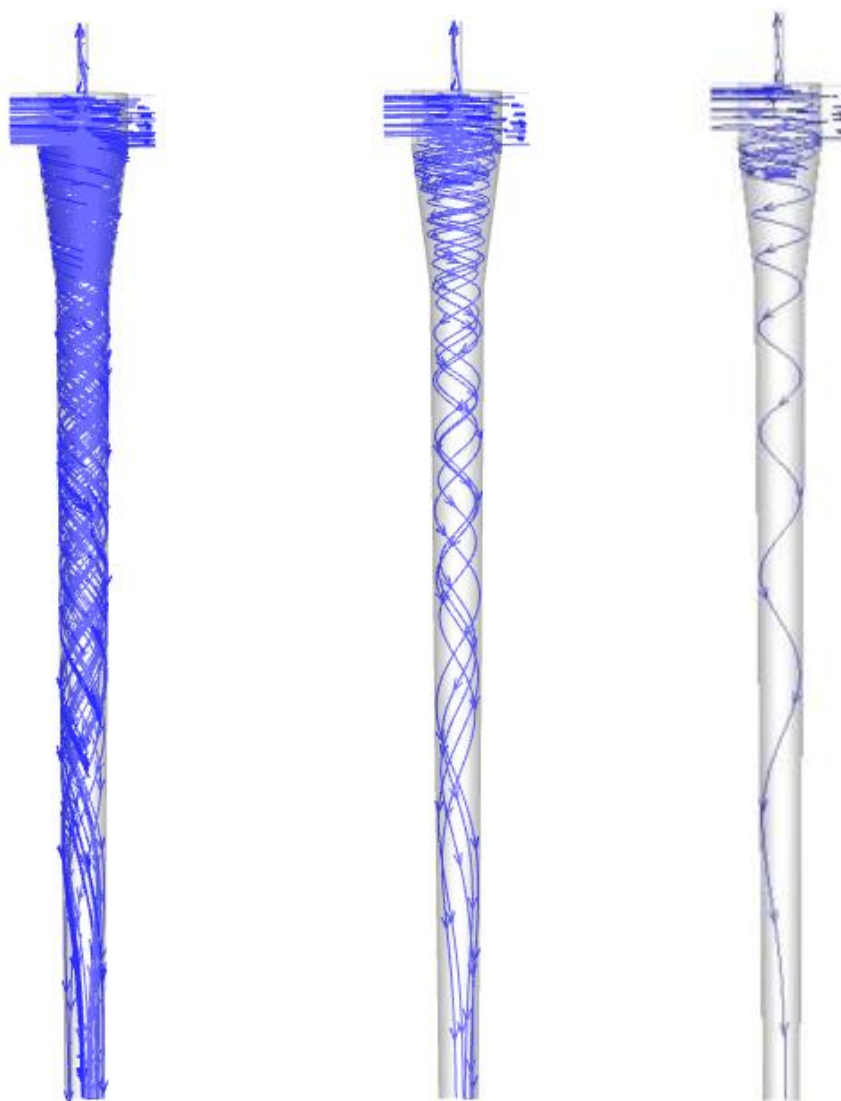
As linhas de corrente para o escoamento, como mostradas na Fig. (19), Fig. (20) e Fig. (21) evidenciam o escoamento em espiral por toda a extensão do hidrociclone, com a maior parte da vazão alimentada saindo pelo *underflow* que coincide com a saída de água.



**Figura 20.** Escoamento de óleo e água no hidrociclone. Fonte: Elabotração própria



Portanto, o caminho descendente percorrido pela água que, corresponde a maior massa total da mistura, saindo pelo *underflow*, indica que o processo de separação está ocorrendo de maneira correta, condizente com a literatura.



**Figura 21.** Linhas de corrente dos fluidos. Fonte: Elaboração Própria

#### 4.1 EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO FRACIONADA

Portanto, ao final da simulação foi possível analisar o número de partículas que entravam no hidrociclone e o número de partículas que deixavam o hidrociclone pelo *underflow* e pelo *overflow*.

Na qual sabe-se que quanto maior for a diferença de densidade entre o sólido e o fluido, mantendo-se as outras variáveis constantes, menor será o diâmetro de corte ( $D^*$ ), ou seja, maior será a eficiência de um hidrociclone.

Assim, pode-se calcular a eficiência do hidrociclone para o tamanho de partícula inserida.

$$\eta = \frac{n_{\text{coletada no underflow}}}{n_{\text{injetadas}} - n_{\text{número de partículas não calculadas}}} \quad (21)$$

$$\eta = \frac{17}{284 - 0} = 0.06$$

Desse modo, a Eq. (21) mostra a expressão para o cálculo da eficiência individual de coleta que é relativo a probabilidade de partícula de diâmetro ( $D^*$ ) ser coletada no *underflow*.

Em vista disso, os resultados mostraram que de 284 partículas de óleo injetadas, 267 saíram pelo *overflow* e 17 saíram pelo *underflow*, na qual nenhuma partícula deixou de ser calculada.

Logo obtemos por meio das simulações que as partículas de óleo de tamanho  $D = 1\mu\text{m}$  com  $\eta = 0,06$  tem 6% de chance de ser recolhida no *underflow*, juntamente com a água. Desse modo, 94% das partículas foram direcionadas ao caminho correto, ou seja, ao *overflow*, na qual é o local onde recolhe as partículas com menor densidade, no presente caso, o óleo.

## 5. CONCLUSÃO

Assim, os hidrociclones possuem uma grande importância no setor industrial e são muito utilizados em diversas áreas, como para separações líquido-líquido, sólido-líquido e, etc. Ademais são equipamentos simples e de tamanho reduzido em relação a outros separadores, apresentando baixo custo de aquisição, manutenção e operação.

Desta forma e como foco deste trabalho, verificou-se uma escassez de trabalhos disponíveis na literatura sobre a separação de misturas de óleo-água envolvendo hidrociclones, assim como observado por outros autores.

A vantagem da utilização de hidrociclones reside não só na maior eficiência em relação aos separadores gravitacionais, mas também na menor área de convés, devido ao fato destes equipamentos serem mais compactos.

Com o avanço da capacidade de processamento dos computadores e dos algoritmos, as ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD) estão sendo cada vez mais empregadas na resolução de problemas envolvendo escoamento de fluidos em condições complexas.

Ainda que a simulação numérica não substitua completamente os experimentos, ela reduz os custos experimentais para investigações de variáveis de projeto, além de permitir estudos para melhoria das condições operacionais.

O presente trabalho mostrou-se bastante condizente com a literatura, com o estudo experimental de Marins *et al.* (2010) e outros trabalhos semelhantes, por meio das simulações realizadas.

Os resultados obtidos de RQP, razão de fluido, perfis de velocidade, distribuição de pressão e eficiência de separação fracionada apresentaram boa simetria na geometria analisada e nota-se que a presença de duas entradas garante uma maior estabilidade hidrodinâmica.

Os custos computacionais foram muito significativos e o longo tempo de simulação levou em consideração, substituição de parâmetros importantes, como por exemplo, a troca do modelo de turbulência  $K-\epsilon$  pelo RSM (Reynolds Stress Model) por ser mais adequado, além da repetição do processo para diferentes malhas.

Ademais, foi observado o número de partículas que entravam no hidrociclone e o número de partículas que deixavam o hidrociclone no *underflow* e no *overflow*. Então, calculada a eficiência de coleta, na qual a maior parte das partículas de óleo foram direcionadas ao *overflow*, mostrando que a separação ocorreu de maneira adequada. Portanto, resultando em uma eficiência de separação fracionada igual a  $\eta = 0.06$ , na qual isso significa que as partículas de óleo com  $D = 1\mu\text{m}$  tem 6% de possibilidade de ser coletada no *underflow*.

## 6. REFERÊNCIAS

- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Demanda dos setores de energia, energia proveniente de origem fóssil, petróleo na matriz energética. Out de 2017.
- ALMEIDA, L. C. de. Simulação numérica da separação água-óleo em hidrociclones para baixas frações de óleo. Projeto de Final de Curso: Escola de Química / UFRJ. Rio de Janeiro, 2009.
- ANDRADE, V. T. Construção e avaliação de modelos de hidrociclone para tratamento de água residuária. Dissertação. UNICAMP. SP 2007.
- ANNA, A.A.S; MEDEIROS, J.L; ARAÚJO, O.Q.F. Simulação de processamento de gás natural em plataforma *off-shore*. 3º Congresso Brasileiro em P&D em Petróleo e Gás. 2005 UFRJ. RJ.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). International Energy Agency: (IEA). Utilização do Petróleo nos diferentes setores da Indústria, estimativa de recurso. Out de 2016.
- ALVES, J.V.B: Hidrociclone para separação do óleo residual em água em refinarias. Pós-graduação. UFRJ. RJ. 2012.
- AMARAL, M.DA.C: Uso de hidrociclone na separação de partículas de baixa densidade no processo de perfuração com duplo gradiente. Dissertação de mestrado. UFRJ. RJ. 2012.
- ARAÚJO, C.A.O; SHEID, C.M; KLEIN, T.S; LOUREIRO, J.B.R; MEDRONHO, R.A: Eficiência de separação de hidrociclones para a separação de misturas água-óleo com alto teor de óleo: Comparação entre resultados simulados e experimentais. UFRJ. ENEMP. Anais do ENEMP 2015 – XXXVII. Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, SP 2015.
- COELHO, D.B. UFRN. ANP. Desempenho de um hidrociclone para separação de águas oleosas. Natal. 2011.

- CRUZ, O.DA; ZANINI, J.R. Eficiência de um hidrociclone de geometria “Rietema” para pré-filtragem de água. Revista Engenharia agrícola, Jaboticabal, v.30, n.4, p.637-645, Jul/ago.2010.
- CERRI, F.F.P. Estudo para validação de modelo gás-óleo em separação ciclônica de sais de iodo na indústria química. Dissertação de mestrado. UFSC. SC. 2010.
- DIBB, A. Comportamento fluidodinâmico do ciclone em diferentes geometrias. UEC. Campinas. Dissertação de Mestrado.1997.
- Fluent, Inc., 2006, "Fluent 6.3 Documentation".
- FREITAS, A. G. B. de. Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclone. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2009.
- HUSVEG, T., RAMBEAU, O., DRENGSTIG, T. Performance of a deoling hidrocyclone during variable flow rates. Minerals Engineering 20 368-379, Norway, 2007.
- HSIEH, K.T., RAJAMANI .K. Phenomenological model of the hydrocyclone: Model development and verification for single-phase flow. Elsevier. University of Utah, Salt Lake City.USA.1986
- OFUCHI, E.M; GENARO, J; STEL.H; FRANCO, A.T.AUGUSTUS, M.; ESTEVAN.V; MORALIS, R.E.M. Estudo numérico com superfície livre em um hidrociclone. Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos. Curitiba. 2012
- JAHN.F, COOK.M, GRAHAM. M, FERREIRA.D. Introdução à exploração e Produção de hidrocarbonetos. 2ª edição. Elsevier. Editora Campus. Rio de Janeiro, 2012.
- JUNIOR, J.I.S.S; LINHARES, L.L.S; SILVA, P.K.F; ARAÚJO, F.M.U.LÓGICA FUZZ para controle de vaso separador trifásico em plantas de processamento primário de petróleo.UFRN.Natal.2011.
- LIU, W.G; FENG.Y.Q Numerical and experimental studies of flow field in hydrocyclone with air core. ELSEVIER. Northeastern University, Elsiver Shenyang. CHINA

- MENDES, Thiago de Araújo; RODRIGUES FILHO, Saulo. Antes do pré-sal: emissões de gases de efeito estufa do setor de petróleo e gás no Brasil. *Estud. av.*, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 201-218, 2012.
- MARINS, L. P. M., DUARTE, D. G., LOUREIRO, J. B. R., MORAES, C. A. C. LDA and PIV characterization of the flow in hydrocyclone without an air-core. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Cnpes/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- MORANDIN, M. L. "Modelagem de um filme líquido sob a ação combinada dos campos centrífugos e gravitacional de forças: hidrociclones. Dissertação de Mestrado.UEC.Campinas.1999.
- NEZHATI, K.; THEW, M.T.; Aspects of the performance and scaling of hydrocyclones for use with light dispersions, 3<sup>rd</sup> International Conference on Hydrocyclones.1987.
- PETROBRAS. Petróleo Brasileiro S.A. Destaques operacionais – Exploração e Produção – Custo de Extração. Out de 2016.
- PINTO, H.Q.P. Economia de energia.1º ed.ELSEVIER.2007.São Paulo.
- SALVADOR, F.F: Estudo experimental do comportamento de um hidrociclone com cone e cilindro filtrante. Programa de Pós-graduação.UFU.Uberlândia.2013.
- SANTOS, J.A. Estudo sobre processamento primário de petróleo. UFRN.Natal.2015.
- SANTOS, D.A. Perfis de escoamento e injeção de partículas no interior de um hidrociclone. UFU.Uberlândia.2002.
- SHEAU, L.H. Synthetic fractionation in hydrocyclones.New York.2001.
- SANTANA, T..M; MACHADO, L.C. Processamento primário de fluidos na produção de petróleo. *Periódico. Aracaju*. v. 2 .n. 3 .p. 11-20.
- SILVA, H.M; MACIEL, G.F. Desenvolvimento e otimização de hidrociclones frente a modificações de variáveis geométricas e de processo. *Iniciação científica*. MG.2009

STORTI, F.C. Estudo experimental da eficiência de separação da câmara de expansão do separador VASP. Tese de doutorado. UNICAMP.Campinas.SP.2013

SOUZA, M.T.V; GONÇALVES, S.M; VIEIRA, L.G.M; BARROZO, M.A.S. Desempenho de um hidrociclone otimizado.XI Congresso Brasileiro de engenharia química em iniciação científica. Campinas.SP.2015

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclones**, Holt, Rinehart and Winston, London, 1984.

SHEID, C.M; KLEIN, T.S; LOUREIRO, J.B.R; MEDRONHO, R.A: Medidas dos perfis de velocidades axiais em um hidrociclone para separação óleo-água: Comparação entre resultados simulados e experimentais. Revista Científica Vozes dos Vales – UFVJM – MG.Brasil – Nº 07 – Ano IV – 05/2015, Reg.: 120.2.095–2011 – UFVJM – QUALIS/CAPES.LATINDEX – ISSN: 2238-6424.

THOMAS, J. E, Fundamentos de engenharia de petróleo. 2º ed., Rio de Janeiro, 2004.